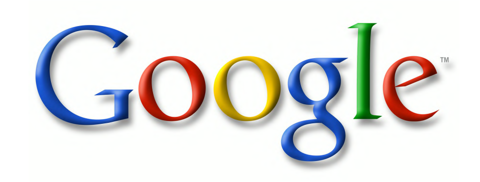





PRESS G. 12.
SHELF 7
No 13




600036687-

COURS

DE

MANIPULATIONS

DE

PHYSIQUE.




ΑΕΙ Ο ΘΕΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΕΙ

L'ÉCOLE PRATIQUE DE PHYSIQUE.

COURS

DE

MANIPULATIONS

DE

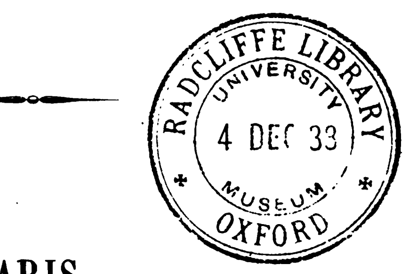
PHYSIQUE,

PRÉPARATOIRE A LA LICENCE;

PAR

M. AIMÉ WITZ,

Docteur ès sciences,
Ingénieur des Arts et Manufactures,
Professeur aux Facultés Catholiques de Lille.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1883

PRÉFACE.

Ce n'est pas sans inquiétude que, cédant au désir d'amis trop bienveillants, je livre à la publicité ce Cours de Travaux pratiques, destiné aux candidats à la Licence.

Les difficultés de la tâche que j'ai entreprise sont, en effet, très grandes : il s'agit de présenter sous une forme didactique l'enseignement expérimental qui se donne au laboratoire, en face des instruments.

C'est par les manipulations que l'élève acquiert la dextérité nécessaire au physicien : c'est là, qu'au dire de Franklin, il apprend à scier avec une vrille et à forer avec une scie. Cette éducation manuelle serait, pour quelques juges très compétents, le principal résultat de l'École pratique : or un livre ne pourrait y contribuer que dans une faible mesure.

Il semble toutefois que ceux qui ont créé les laboratoires d'enseignement se soient proposé un but plus élevé : en mettant entre des mains novices et inexpérimentées les appareils délicats et précis de Fresnel, de Melloni et de Regnault, ils n'ont pas voulu seulement faire connaître à l'élève le jeu de ces instruments; mais, s'ils l'invitent à reproduire les expériences instituées par les maîtres, c'est pour qu'il comprenne l'esprit des méthodes, qu'il en saisisse les finesses et en apprécie les perfectionnements successifs. Un Cours de Travaux pratiques doit donc être l'écho et le complément des leçons

de Physique générale données *ex professo;* ce sera une gymnastique de l'esprit non moins que des doigts.

A ce point de vue, un Traité de Manipulations présente une utilité incontestable : accordant au Manuel opératoire une part plus large que ne peut le faire un livre purement théorique, il fournit au jeune physicien des indications pratiques très précieuses en même temps qu'il lui procure les moyens d'analyser et de discuter les procédés d'observation et de mesure.

Telles sont les idées qui ont présidé à la composition de cet Ouvrage.

Ancien élève du laboratoire de M. Desains, je n'ai eu qu'à me ressouvenir. J'ai aussi consulté avec fruit le *Leitfaden der praktischen Physik* de M. Kohlrausch, ainsi que le *Traité de Manipulations* que Henri Buignet a écrit pour ses élèves de l'École de Pharmacie. Mais c'est surtout en m'inspirant des besoins et de l'expérience de mon enseignement à la Faculté catholique des Sciences de Lille que j'ai tracé le plan et coordonné les détails de ce Livre.

Toutes les manipulations qui le composent sont rédigées sur un modèle uniforme. Une *Introduction théorique* très succincte pose la question à étudier, donne le sens des notations adoptées, et indique les solutions par les formules établies dans le Cours de Physique.

Vient ensuite, sous la rubrique *Description*, un examen rapide des instruments nécessaires à la manipulation : des gravures, empruntées pour la plupart à l'excellent Traité de MM. Jamin et Bouty ou mises à notre disposition par nos constructeurs, permettent à l'élève de suivre sans peine les explications données dans le texte, d'y suppléer au besoin et de reproduire la disposition d'ensemble des appareils.

Le *Manuel opératoire* a été l'objet de tous mes soins : j'ai cherché à être très précis sans devenir trop laconique. Chaque

exercice aboutit à une mesure : les résultats numériques exacts sont indiqués à la fin de chaque Chapitre et réunis dans un Tableau synoptique.

Toutes ces expériences sont réalisables avec les ressources ordinaires d'un laboratoire de Faculté : j'ai pris comme type le cabinet de Physique organisé à Lille par M. Chautard; il peut être proposé pour modèle.

Mon ambition a été de condenser tous les détails pratiques épars dans les Mémoires originaux : des notes bibliographiques indiquent les sources auxquelles j'ai puisé; il sera facile d'y remonter au besoin. Je n'ai guère dépassé le cercle des collections qui composent les bibliothèques de laboratoire.

Je ne regretterai pas mes peines, si ce Livre peut, malgré ses imperfections, contribuer à former de solides licenciés et à préparer les jeunes gens aux recherches plus approfondies qui conduisent au doctorat.

AIMÉ WITZ.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE QUATRIÈME.

Dilatations.

CHAPITRE CINQUIÈME.

Changements d'état.

CHAPITRE SIXIÈME.

Gaz et vapeurs.

CHAPITRE SEPTIÈME.

Chaleur rayonnante.

CHAPITRE HUITIÈME.

Calorimétrie.

CHAPITRE NEUVIÈME.

Magnétisme.

CHAPITRE DIXIÈME.

Électrostatique.

CHAPITRE ONZIÈME.

Électricité voltaïque et électromagnétisme.

CHAPITRE DOUZIÈME.

Induction.

CHAPITRE TREIZIÈME.

De la lumière en général.

CHAPITRE QUATORZIÈME.

Instruments d'optique.

CHAPITRE QUINZIÈME.

Optique physique.

CHAPITRE SEIZIÈME.

Polarisation.

CHAPITRE DIX-SEPTIÈME.

Polarisation rotatoire.

CHAPITRE DIX-HUITIÈME.

Acoustique.

ERRATA.

Pages	Lignes	*Au lieu de*	*Mettez*
168	14	de 5° à 10°	de 25° à 10°
217	11	1093	1,93
221	*fig.* 74	*h*	20 *h*
226	18	0,0012	0,012
393	19 et 36	*h*	*h'*
397	20	places	glaces
407	9	l'une d'elles	l'un d'eux

COURS
DE
MANIPULATIONS
DE
PHYSIQUE.

CHAPITRE I.
OPÉRATIONS DE MESURE.

Ire MANIPULATION.
MESURE ET DIVISION DES LONGUEURS.

Théorie.

La vis est utilisée dans les instruments micrométriques de deux manières différentes : le plus souvent elle est fixe, c'est-à-dire que son axe ne peut se déplacer, tandis que l'écrou, assujetti par des glissières, n'est susceptible d'aucun mouvement angulaire. Nous rencontrons cette disposition dans la machine à diviser la ligne droite; dans le sphéromètre, au contraire, la vis est mobile et l'écrou fixe.

Dans l'un et l'autre instrument, le pas p de la vis étant donné, il n'y a qu'à compter le nombre entier N et la fraction n de tours effectués pour évaluer le déplacement δ de l'écrou ou de la vis :

$$\delta = (N + n)p.$$

Mais, quelque soin qu'on ait apporté à la construction de la

vis, elle n'est jamais parfaite, et il faut tenir compte des défauts d'uniformité qu'elle présente : les différences des pas successifs doivent suivre une loi continue et régulière, pour qu'on puisse en déduire un système de corrections.

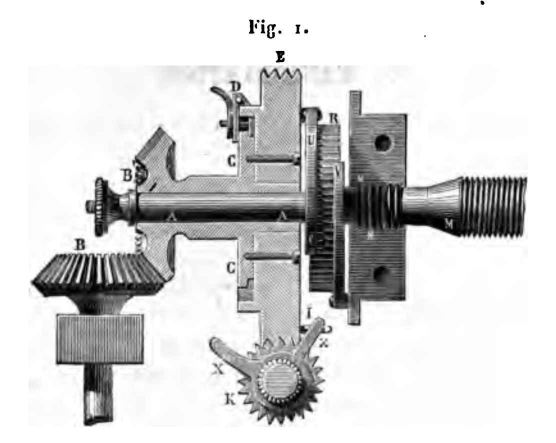
Description.

Chaque constructeur a créé son modèle : nous n'entreprendrons pas de décrire toutes les machines qu'on peut rencontrer dans les laboratoires.

Elles se composent essentiellement d'une longue vis d'acier à tête divisée, maintenue entre des supports fixes : un microscope et un tracelet servent à mesurer et à diviser les longueurs, soit que l'écrou les entraîne dans son mouvement, ou que l'objet lui-même se déplace devant eux.

Une disposition mécanique très élégante (*fig.* 1) est adoptée généralement pour arrêter le mouvement de la vis, indépendamment de l'attention de l'opérateur : elle permet de faire tourner la manivelle d'un angle quelconque, variable à volonté, mais identique à lui-même, pendant toute une expérience. Ce travail, qui exige une grande précision, peut se faire très rapidement, et pour ainsi dire les yeux fermés. C'est par la combinaison d'une roue à rochet R, faisant corps avec la vis,

Fig. 1.



et d'un double système de butoirs et d'arrêts I et D, Z et X que ce résultat est atteint. Le ressort U a pour effet de rendre le rochet solidaire du plateau E dans un sens seulement; les arrêts limitent cette rotation à un nombre de degrés déterminé. Le pignon K, qui engrène avec la vis tracée sur le cercle, produit là rencontre des butoirs et des arrêts; I et Z sont fixes, X et D sont mobiles. C'est en plaçant convenablement ceux-ci par rapport à la graduation de la tête de vis que l'on règle les angles de rotation et, par suite, l'avancement du chariot par tour de manivelle; le mouvement de cette manivelle est nécessairement alternatif.

L'agencement de ces pièces varie d'un modèle à l'autre, mais la manœuvre de la machine est toujours facile à comprendre pour un observateur attentif.

Essai et contrôle d'une machine. — L'épreuve porte sur deux points : le fonctionnement doux et régulier du mécanisme et l'exactitude géométrique du pas de la vis.

Toute vis qui se meut dans un écrou présente un certain jeu et, par conséquent, un temps perdu : il doit être inappréciable, sans que toutefois le mouvement de la manivelle soit dur par excès de serrage sur le filet de la vis. L'opérateur veillera à ce que le ressort glisse sur les dents du rochet sans l'entraîner dans son mouvement rétrograde; de plus, aussitôt que la rotation change de sens, ce ressort doit s'engager entre les dents sans qu'on puisse constater aucun retard, ce qui suppose au rochet une denture extrêmement fine et régulière.

Quelquefois il s'établit une certaine adhérence entre l'axe A et le plateau E, qui est fou sur cet axe : on y remédie en desserrant la vis B′ et en lavant le tourillon par une goutte de pétrole, pour dissoudre les huiles épaissies. Ces petits détails de la pratique devaient être signalés.

Le pas de la vis n'est jamais absolument régulier ni rigoureusement métrique; à cet égard, la machine sera donc soumise à un contrôle minutieux, qui aura pour objectif de déceler les moindres irrégularités et de mesurer la longueur exacte du pas. Il faudra commencer par tracer, sur une règle bien dressée, une ligne droite parallèle à l'axe, en faisant glisser le chariot à la main; ce mouvement est possible dans toutes les machines, en dégageant l'écrou du filet de la vis; puis on mar-

quera sur cette droite deux points correspondant, par exemple, à dix tours complets. Dans les portions successives de la vis, une même longueur doit répondre au même nombre de tours. S'il n'en fallait que 9,96 au lieu de 10, le pas moyen de cet intervalle serait plus grand que le premier dans le rapport de 1000 à 996, et il y aurait lieu d'en tenir compte dans certaines opérations très délicates.

Pour mesurer la longueur exacte du pas, on fixe un mètre-étalon sur le bâti, bien parallèlement à l'axe de la machine : on en vise l'extrémité au microscope et l'on fait marcher la manivelle; il n'y a qu'à compter le nombre de tours nécessaires pour amener l'autre extrémité sous la croisée des fils du microscope et à diviser 1000 par ce nombre; le quotient est égal au pas. Cette opération est fort délicate, surtout pour les petites machines, car il faut alors la fractionner; mais c'est un exercice auquel les élèves se livreront très utilement pour s'habituer au maniement de cet instrument. En faisant la moyenne de plusieurs mesures, la longueur du pas peut être déterminée au $\frac{1}{1000}$ de millimètre. Les variations de température de la vis ne peuvent être observées ni corrigées rigoureusement.

Manuel opératoire.

I. *Mesure des longueurs.* — 1° La droite à mesurer doit être établie tout d'abord parallèlement à l'axe de la vis; cette condition sera remplie lorsque les deux points extrêmes tomberont sous la croisée des fils du microscope et seront visibles avec la même netteté, sans rien changer au tirage de l'appareil optique.

2° Les deux arrêts étant mis au zéro de la graduation qui est tracée sur la tête de la vis, on comptera le nombre de révolutions nécessaires pour amener tour à tour les deux extrémités en coïncidence avec le centre du réticule. Il restera à multiplier ce nombre par la longueur du pas. On recommandera aux commençants de tourner la manivelle d'un coup, sans hésitation et sans arrêt, et de faire résonner les butoirs, ce qui n'exclut point la douceur des mouvements.

II. *Division d'une longueur donnée* L *en* n *parties égales.*

— 1° Chaque division devant avoir une longueur égale à $\frac{L}{n}$, l'opérateur dispose d'abord l'arrêt mobile au point voulu de la circonférence de tête; puis il procède à un essai à blanc, de manière à modifier le réglage s'il y a lieu, en tenant compte du reste qui peut se présenter à la fin de l'opération.

2° Il fixe le tracelet à la hauteur voulue et, tirant et poussant d'une main, tournant de l'autre, il effectue la graduation. Un mécanisme particulier est chargé de donner des longueurs différentes aux traits multiples pairs et impairs de cinq.

III. *Division d'une règle de mesure en millimètres.* — Ce problème se résout aussi simplement que le précédent : on tiendra compte de la longueur vraie du pas de la vis.

Un excellent exercice à proposer aux élèves est la construction d'un micromètre. Ils prendront une lame de verre, dépolie d'un côté, et promèneront la face polie dans la flamme d'un appareil de Marsh, de façon à la recouvrir d'une légère couche d'arsenic. C'est sur cette couche, qui est d'un maniement bien plus facile qu'une couche d'argent, qu'on tracera la graduation. Après avoir inscrit les numéros, on recouvre l'arsenic de vernis photographique.

Ces micromètres sont d'un excellent usage en électricité et en optique.

IIᵉ MANIPULATION.

MESURE DES ÉPAISSEURS ET DES RAYONS DE COURBURE PAR LE SPHÉROMÈTRE.

Théorie.

Le sphéromètre sert à mesurer les épaisseurs des lames minces à faces parallèles, ainsi que les rayons de courbure des surfaces cylindriques et sphériques.

Il permet d'évaluer $\frac{1}{1000}$ de millimètre de distance d'une pointe à un plan : l'épaisseur d'une lame posée sur ce plan se

déduit de cette observation par simple lecture ; le rayon d'une sphère s'obtient à l'aide d'un calcul facile.

Appelant, en effet, e la flèche d'un segment de sphère ayant pour base le cercle circonscrit au triangle équilatéral déterminé par les trois pieds du sphéromètre, r le rayon de ce cercle et R le rayon inconnu de la sphère, on a

$$R = \frac{e^2 + r^2}{2e},$$

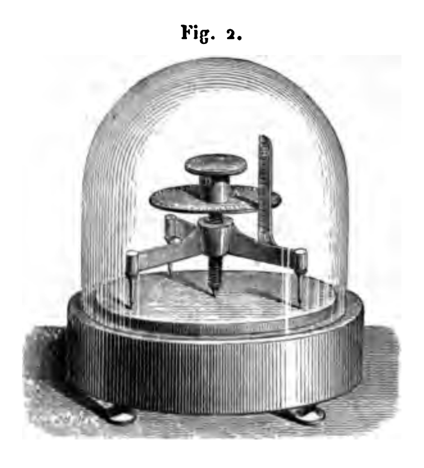
ou bien, en exprimant R en fonction de la longueur l des côtés du triangle,

$$R = \frac{e}{2} + \frac{l^2}{6e}.$$

Description.

Le sphéromètre (*fig.* 2) se compose essentiellement d'une vis micrométrique dont l'axe doit être rigoureusement normal

Fig. 2.



au plan des trois pointes sur lesquelles repose son écrou. Le pas de la vis est généralement d'un demi-millimètre et la tête est divisée en 500 parties égales. La manœuvre se fait par le bouton D ; la règle verticale BC, graduée en demi-millimètres, permet de compter les tours et sert de repère pour évaluer

sur le limbe A les fractions de tour dont la vis s'est avancée dans le sens de son axe.

La lame de glace douce et polie sur laquelle on pose l'instrument est indispensable aux mesures : elle doit être un plan parfait.

Examen et contrôle de l'instrument. — Un examen sommaire de l'instrument permet de juger s'il possède les qualités essentielles d'un bon sphéromètre. On s'assurera d'abord que la vis s'emboîte très exactement dans son écrou en la faisant tourner lentement; ce mouvement doit être doux, sans présenter le moindre jeu. Quelques constructeurs disposent sur l'écrou une petite vis de pression destinée à régler le serrage. Les pointes ne doivent être ni trop fines ni trop aiguës, sinon elles s'émousseraient rapidement et le zéro du plateau A ne correspondrait plus au zéro de la règle BC : il est, du reste, bien rare que cette coïncidence persiste après un certain usage, ce qui a déterminé M. Duboscq à rendre le zéro variable par soulèvement du repère.

Les longueurs r et l sont généralement inscrites par le constructeur sur le trépied : on les vérifie en imprimant la trace des pointes sur un carton que l'on porte à la machine à diviser.

La valeur métrique du pas et sa régularité sont difficiles à contrôler : d'ordinaire, on se contente de l'affirmation du constructeur, sans exagérer la rigueur des mesures absolues qu'on peut effectuer (1).

Il est aisé de s'assurer de la perfection du plan : la méthode optique suivante est d'une délicatesse extrême et d'un emploi facile.

On observe par réflexion sur la surface l'image d'un objet délié, tel que la fente d'un collimateur, à l'aide d'une bonne lunette. Si l'on peut voir l'objet directement et par réflexion, sans être obligé de modifier le tirage, et surtout si l'image est également nette sous toutes les incidences, la surface est

(1) Rappelons toutefois au lecteur les procédés optiques à l'aide desquels Biot a mesuré l'épaisseur des lames minces : ils pourraient être appliqués à la vérification du pas de la vis en ses différents points. Voir, à ce sujet, la LXXXIIIe manipulation.

plane; perd-elle au contraire de sa netteté, il faut rejeter le plan, ou du moins rechercher quelle portion de la surface satisfait aux conditions de cette épreuve. On marquera de la sorte une zone parfaitement plane, sur laquelle devront s'effectuer toutes les observations.

Manuel opératoire.

I. *Mesure des épaisseurs.* — 1° Le sphéromètre étant posé sur le plan, on abaisse la vis jusqu'à son contact, et l'on note le nombre de tours et de fractions de tour auxquels correspond cette position initiale : c'est le zéro de l'instrument.

2° On soulève la vis et l'on glisse sous la pointe la plaque dont on veut mesurer l'épaisseur; puis la vis est ramenée au contact et on lit l'épaisseur par différence.

II. *Mesure des rayons de courbure.* — 1° La position initiale est notée comme ci-dessus.

2° On porte l'instrument sur la sphère après avoir relevé la vis, et l'on rétablit le contact. La différence des deux positions de la vis donne la hauteur de la flèche e.

Il y a un tour de main à acquérir dans le maniement du sphéromètre pour l'appréciation du contact. On doit commencer par abaisser l'extrémité de la vis au-dessous du plan des pointes : alors l'instrument mal calé oscille autour de la droite qui passe par deux de ses points d'appui, ou bien il pivote autour de la pointe centrale, double phénomène qu'il s'agit d'apprécier avec une extrême précision en s'aidant des yeux et de l'ouïe. On supprime graduellement tout mouvement et tout bruit en relevant lentement la vis : un moment arrive où le ballottement et la rotation ne sont plus possibles; on peut alors procéder à la lecture. Les commençants feront bien de vérifier que le contact existe encore en faisant redescendre la vis d'une très faible quantité, de manière à reproduire les caractères précédemment observés; de la sorte, ils contrôleront le premier résultat et détermineront en même temps le degré d'approximation qu'on peut atteindre avec un instrument donné. Le meilleur sphéromètre admet une tolérance de $\frac{2}{1000}$ à $\frac{3}{1000}$ de tour.

Une des plus grandes difficultés de cette opération réside dans l'incertitude qui existe toujours relativement à la pression que l'on exerce avec la pointe de la vis sur le corps à mesurer : on est exposé à le déprimer ou à rayer les surfaces. M. Brunner et plus tard M. Perreaux ont proposé de mesurer cette pression par un petit levier à ressort, mais ils introduisaient ainsi une complication nouvelle qui entraînait une cause d'erreur aussi considérable que celle qu'ils cherchaient à éviter. Une grande délicatesse de mouvement conduit plus simplement au but. Quand on opère sur un corps mou, on en recouvre la surface par une lamelle de verre à faces planes, dont on devra défalquer l'épaisseur du résultat observé.

IIIe MANIPULATION.

MESURE DES HAUTEURS VERTICALES PAR LE CATHÉTOMÈTRE.

Le cathétomètre a pour objet de mesurer la différence de niveau de deux points situés ou non sur une même verticale. Dulong et Petit l'imaginèrent à l'occasion de leur grand travail sur la dilatation du mercure; il est devenu d'un usage très fréquent pour l'évaluation de la hauteur des colonnes liquides.

Description.

Cet instrument (*fig.* 3) consiste en une colonne verticale le long de laquelle glisse une lunette qu'on peut amener à une hauteur voulue en la dirigeant dans un azimut quelconque. Dans les premiers cathétomètres, la règle divisée tournait autour d'un axe extérieur; la lunette et tout le système étaient équilibrés par un contre-poids. Ce modèle, peu satisfaisant, est presque abandonné.

Aujourd'hui les instruments sont plus stables, car ils pi-

votent sur un axe d'acier situé dans l'intérieur même de la colonne; ils ne présentent donc plus de porte-à-faux.

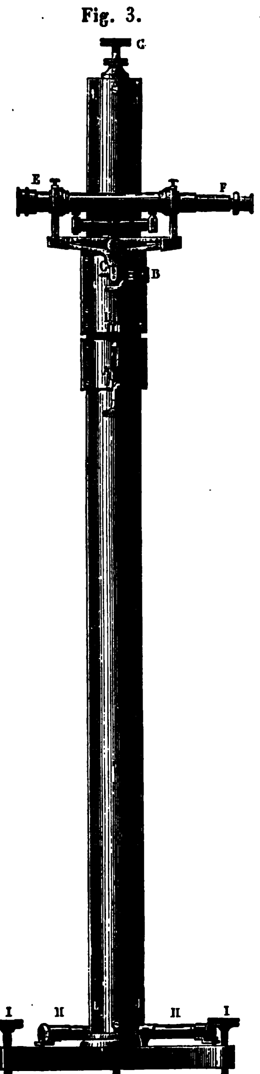


Fig. 3.

L'équipage mobile qui soutient la lunette se compose d'un double manchon A et B dont les deux parties sont réunies par une vis de rappel AD. Un bouton de serrage, invisible dans le dessin ci-contre, permet de fixer le curseur inférieur A, après avoir amené le point observé dans le champ de la lunette; on achève la visée en tournant la vis AD.

La vis BC permet de gouverner la fourchette, dont les colliers sont alésés avec le plus grand soin.

On appelle *axe géométrique de la lunette* l'axe commun du tube et des colliers; l'axe optique est défini par la croisée des fils du réticule et par le centre de l'objectif.

Le mouvement de l'instrument doit être doux et précis. Le trépied sera lourd et massif; les deux niveaux inférieurs que l'on voit sur la figure sont inutiles : celui de la lunette suffit au réglage. On place l'instrument sur une base absolument immuable, telle qu'une pile de maçonnerie dont les fondements très larges soient indépendants de ceux du bâtiment, et qui ne touche pas les planchers qu'elle traverse. Il est prudent de placer directement le cathétomètre sur une plaque dressée, de verre ou de fonte, dans laquelle les vis calantes ne puissent s'imprimer.

On reconnaîtra à l'usage qu'aucun cathétomètre n'est parfait;

toutes les fois qu'on transportera le chariot du haut en bas de la colonne, la bulle du niveau de la lunette subira un déplacement dont il faudra prendre son parti ; on tournera légèrement la vis de la fourchette pour la ramener à l'horizontalité au moment de chaque lecture.

Manuel opératoire.

I. *Réglage de l'instrument.* — 1° On commence par faire coïncider les axes géométrique et optique de la lunette; la croisée des fils étant nettement visible, on s'assure que, en tournant la lunette sur elle-même dans son collier, le point central du réticule se projette toujours sur le même point de l'espace; si ce n'était pas, on modifierait la position des fils à l'aide des vis disposées à cet effet sur l'oculaire.

2° Il faut constater, en second lieu, que l'axe de la lunette est parallèle au niveau. On amène donc la bulle d'air entre ses repères, en agissant sur la vis BC; puis on soulève la lunette hors du collier, et on la retourne bout pour bout. La bulle ne doit pas changer de position; se serait-elle déplacée de n divisions, il faudrait corriger de moitié ce mouvement à l'aide de la vis du niveau, et recommencer l'épreuve jusqu'à réussite.

3° L'instrument étant installé, il s'agit de disposer l'axe de la lunette perpendiculairement à l'axe de rotation de la colonne. Pour cela, on note la position de la bulle du niveau, puis on fait tourner l'instrument de 180° et l'on vérifie si la bulle n'a pas changé de place par rapport à l'observateur. Dans le cas d'un déplacement, on aurait à faire mouvoir la vis BC de manière à corriger de moitié le déplacement. Il est ordinairement nécessaire de répéter plusieurs fois cette opération.

4° Il reste à placer verticalement l'axe de la colonne : ce résultat s'obtient à l'aide de vis calantes dont le pied est muni. Ce pied est triangulaire ; on dirige d'abord la lunette parallèlement à la base du triangle, et l'on amène la bulle au zéro ; puis on tourne la lunette de 90° et l'on opère de même en agissant sur la troisième vis. Ainsi réglé pour deux plans rectangulaires, l'instrument doit l'être dans tous les azimuts, car l'axe est perpendiculaire à deux horizontales qui se coupent à angle droit.

Le réglage sera parfait si le niveau de la lunette dirigée dans n'importe quelle direction ne cesse pas d'être au zéro. On s'assurera mieux encore du réglage en visant un point de l'espace, qu'on devra retrouver sous la croisée des fils après rotation de 180° et retournement de la lunette.

II. *Mesure des hauteurs.* — On peut apprécier des différences de hauteur verticale de près de 1^m; mais, si les deux points sont dans des azimuts verticaux très différents, c'est une des opérations les plus délicates de la Physique, car il n'est pas d'instrument plus difficile à gouverner que le cathétomètre. Aussi prend-on souvent comme intermédiaire un troisième point qui soit à peu près à la même hauteur que le premier et presque sur la même verticale que le second. La verticalité de la colonne étant bien établie, il n'y a qu'à lire par différence la distance des plans de visée.

Il est possible de relever le $\frac{1}{50}$ de millimètre, mais cette approximation est fictive si l'on n'a pas vérifié la valeur métrique de la règle divisée. D'autre part, la dilatation irrégulière du métal, dont la température n'est pas uniforme, introduit une nouvelle cause d'erreur qu'il est difficile d'éliminer par la correction d'usage. L'opérateur devra se garder de toucher la règle : il n'appuiera les mains que sur le trépied, sans jamais exercer de pression horizontale qui compromettrait le réglage. S'il était obligé de modifier le tirage de la lunette, il la soulèverait hors du collier pour la mettre au point voulu, de manière à ne pas ébranler la colonne. Toutes ces précautions sont de rigueur quand on emploie le cathétomètre, sinon il faut s'attendre aux plus grossières erreurs.

Résultats.

Un excellent exercice consiste à faire observer aux commençants un baromètre fixe de Regnault : ils mesureront d'abord la distance de la pointe supérieure de la vis de contact au niveau du mercure dans le tube; puis, relevant cette vis jusqu'à ce que sa pointe inférieure vienne au-dessus des bords de la cuvette, ils détermineront sa longueur. On peut encore leur donner à contrôler un baromètre Fortin : le zéro de la

graduation coïncidant avec l'extrémité de la pointe d'ivoire qui sert de repère d'affleurement, on devra trouver entre ce point et n'importe quelle division une distance verticale égale à celle qui est inscrite sur le tube.

IVe MANIPULATION.

ESSAI D'UNE BALANCE. — PESÉE.

Théorie.

Une balance doit être juste et sensible, pour permettre d'effectuer une pesée rigoureusement exacte.

Elle sera juste si le fléau se tient horizontal sous l'action de deux poids égaux; elle sera sensible si elle accuse, par une forte inclinaison du fléau, une surcharge très légère d'un des plateaux. Une balance qui trahirait nettement $0^{gr},001$ de différence entre deux poids de 500^{gr} mériterait d'être considérée comme sensible; mais on en a construit qui donnent sous la même charge le $\frac{1}{10}$ du milligramme.

Or voici les conditions indiquées par la théorie pour réaliser le maximum de sensibilité. Il faut :

1° Faire les deux bras du fléau rigoureusement égaux;

2° Donner au fléau la plus grande longueur, la plus grande rigidité et la plus grande légèreté possibles;

3° Établir les axes de suspension des plateaux et le centre d'oscillation en ligne droite;

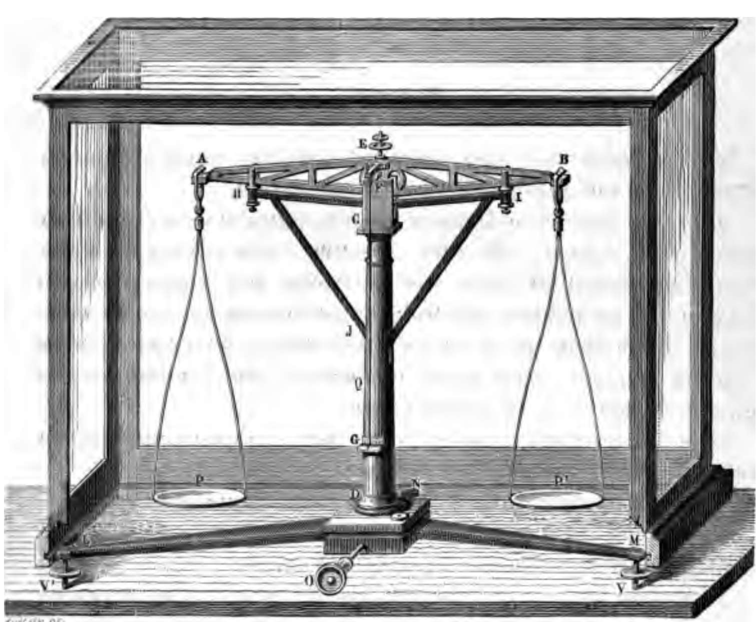
4° Placer le centre de gravité des organes mobiles au-dessous et très près du centre d'oscillation;

5° Donner enfin aux articulations une douceur extrême et les réduire à des points géométriques.

Description et essai d'une bonne balance.

L'énoncé des conditions multiples requises pour une balance de précision peut tenir lieu d'une description de cet instrument si connu. Gambey, Fortin, Lecomte, Deleuil et Salleron ont créé des types excellents dont les détails sont généralement reproduits par les constructeurs français; on les retrouve presque tous dans le dessin ci-dessous (*fig.* 4).

Fig. 4.



Toute l'attention s'est portée à juste titre sur la position du point d'oscillation, des deux axes de suspension et du centre de gravité, puisque c'est de la situation relative de ces points que dépend la délicatesse de la balance. Il est rationnel de réserver à l'opérateur un moyen de correction, en permettant le déplacement vertical et horizontal d'un des couteaux ex-

trêmes A ou B. Quant au centre de gravité, on le relève à volonté à l'aide de la double vis E.

L'essai d'une balance est une opération difficile qui demande à être conduite avec méthode.

L'instrument sera placé sur une table massive très stable, à l'abri des trépidations : une console scellée au mur remplira le mieux cette condition.

Après avoir procédé à l'installation et à la mise de niveau à l'aide des vis calantes dont les pieds sont munis, il convient de soumettre d'abord la balance à une série d'épreuves mécaniques. On s'assurera que le fléau mis à l'arrêt est parfaitement immobile; les deux fourchettes qui l'embrassent doivent le saisir simultanément et libérer complètement les couteaux. Abandonné à lui-même, le fléau d'une bonne balance oscille lentement, sans que l'amplitude de ses oscillations décroisse trop rapidement; arrivée progressivement au repos, son aiguille doit s'arrêter au zéro. Elle sera encore au zéro lorsque les plateaux auront reçu le maximum de leur charge, indiquée par le constructeur, et cet équilibre ne sera pas modifié lorsqu'on transportera les masses du centre au bord des plateaux, ou bien lorsqu'on intervertira les poids : cette dernière manœuvre a pour objet de s'assurer de l'égalité des deux bras. L'aiguille doit se mouvoir parallèlement à la règle graduée G appliquée sur la colonne, et tout près de cette règle pour éviter les erreurs de parallaxe. Ces vérifications faites, on relèvera les fourchettes; l'aiguille doit encore marquer zéro. Telles sont les conditions mécaniques auxquelles satisfait une balance bien construite.

Il convient, en second lieu, de procéder à l'appréciation de la sensibilité.

On peut le faire grossièrement en observant tout d'abord la durée des oscillations du fléau : plus elles sont longues, plus l'instrument a de sensibilité; elles doivent en tous cas dépasser douze secondes. Mais l'opérateur dispose en partie de cet élément par la vis qui surmonte le fléau.

La sensibilité peut être évaluée mathématiquement par la mesure des déplacements de l'aiguille pour $0^{gr},001$ de surcharge. Ce serait une longue opération s'il fallait attendre que l'aiguille devînt immobile : cette manière de faire serait

d'ailleurs peu exacte, car le repos du fléau peut ne pas être la conséquence d'un équilibre parfait, mais provenir d'un obstacle accidentel ou d'un défaut de mobilité. Il est bien préférable d'observer les points extrêmes d'une oscillation et de faire la moyenne des écarts. Or la décroissance de l'amplitude nécessite un nombre impair de lectures : on en fait généralement cinq, que nous désignerons par leurs numéros d'ordre I, II, III, IV et V; I, III et V seront, par exemple, pris à la droite du zéro et II et IV à sa gauche. On fait la moyenne particulière des trois écarts de droite et des deux écarts de gauche, en affectant les uns du signe +, les autres du signe —, puis on effectue la moyenne générale.

Voici un exemple du calcul :

	I.	II.	III.	IV.	V.	Moyennes.	Zéro.
Écarts à droite....	+ 3	»	+ 2	»	+ 2	+ 2,33	+ 0,42
» à gauche...	»	— 2	»	— 1	»	— 1,50	

Le zéro vrai de la balance est donc connu; il est à 0,42 à droite du zéro de la graduation. On charge alors le plateau de gauche de $0^{gr},002$; il en résulte que la position moyenne de l'aiguille oscillante est déplacée vers la droite. On détermine cette position et on trouve, par exemple, + 4,90; l'écart produit du chef de la surcharge par $0^{gr},001$ est donc de $\frac{4,90 - 0,42}{2}$, soit de 2,24; ce nombre mesure la sensibilité de la balance.

Nous savons, par la théorie, qu'elle décroît à mesure que la charge absolue des plateaux augmente. Il est du plus haut intérêt de connaître la loi de ses variations : l'opérateur pourra de la sorte apprécier le degré d'approximation dont une pesée est susceptible et n'aura pas à craindre, d'autre part, de dépasser la limite de poids que l'instrument peut supporter sans cesser d'être précis.

Il s'agit donc de répéter l'opération décrite ci-dessous pour une surcharge de $0^{gr},002$ du même plateau de gauche, alors que les deux bassins portent chacun une charge croissante de 50^{gr} en 50^{gr}.

L'égalité rigoureuse de deux poids marqués n'étant jamais

réalisée, il importe de déterminer de nouveau la position exacte du zéro avant l'addition de la surcharge. On constate que la sensibilité décroît rapidement; voici les résultats fournis par une balance du cabinet de Physique de la Faculté libre des Sciences de Lille :

Charges....	0	50	100	200	300	400	500
Sensibilité..	3,80	3,62	3,25	2,24	1,43	0,86	0,59

Pour tirer de l'essai qui précède tout le parti possible, il est bon de tracer une courbe, en portant en abscisse les charges et en ordonnée les chiffres qui expriment la sensibilité : on affiche cette courbe dans la cage de la balance, de manière qu'elle puisse être consultée utilement; telle est la courbe représentée par la *fig.* 5.

Fig. 5.

Les poids doivent aussi être contrôlés avec un soin extrême : ces essais sont nécessaires non seulement pour s'assurer de leur exactitude quand ils sont neufs, mais pour reconnaître l'altération qu'ils ont subie par l'usage. On vérifie avant tout que le milligramme est la dixième partie du centigramme, celui-ci la dixième partie du décigramme, et ainsi de suite; enfin un des poids sera comparé à un étalon.

On observe toujours une différence sensible, mais on admet une tolérance de quelques dixièmes de milligramme sur les poids de laiton.

Frésénius fait observer, du reste, qu'une légère oxydation ne met pas ces poids hors d'usage, car cet enduit qui recouvre le métal est très léger et parfaitement négligeable.

Manuel opératoire d'une pesée.

Le poids d'un corps se détermine toujours par la méthode de Borda, dite de la double pesée. Elle consiste à placer le corps dont on cherche le poids sur l'un des plateaux et à en faire exactement la tare par une masse métallique quelconque: l'équilibre étant obtenu, on ôte le corps, et, sans toucher à la tare, on le remplace par des piods marqués, de manière à ramener l'aiguille au point qu'elle occupait précédemment. La somme de ces poids représente le poids cherché, quelle que soit la justesse de la balance.

Il y a souvent avantage à opérer de la manière suivante : le poids maximum du corps étant approximativement connu, on fait d'abord la tare d'un poids marqué supérieur, puis on y substitue le corps et l'on met à côté de lui le nombre de gramme nécessaire pour faire équilibre à la même tare. Ce complément, étant retranché du poids primitif, donne, par différence, le poids du corps, avec la rigueur de la double pesée et d'une manière très expéditive.

La tare est conservée avec soin pour les opérations subséquentes. Ce procédé est indiqué surtout pour les pesées de substances renfermées dans un récipient quelconque, vase, creuset, flacon, etc.; le contenant, placé à côté du poids limite, est taré du même coup, et l'on gagne une opération.

C'est par l'observation des oscillations que l'on constate l'équilibre : cette méthode a le double avantage de rendre la pesée plus rapide et plus exacte. Les écarts de l'aiguille de chaque côté du zéro permettent de juger de la valeur des poids qu'il convient d'ajouter ou de retrancher, et avec un peu d'exercice et une parfaite connaissance de l'instrument dont on se sert, on obtient l'équilibre après deux ou trois essais. La courbe dès sensibilités est d'un grand secours en cette occasion, car elle indique la relation qui existe entre l'amplitude de l'écart et la différence des poids pour une charge totale donnée; une simple règle de trois, que l'opérateur peut effectuer sans écrire aucun chiffre, permet de déterminer le nombre de milligrammes nécessaire pour parfaire l'équilibre.

Quelques recommandations pratiques doivent être faites aux jeunes physiciens qui sont admis à l'usage d'une balance de précision. On ne place jamais directement sur les plateaux une substance qu'on ne puisse saisir sans toucher aux bassins; il faut la mettre sur un verre de montre, une capsule ou une feuille de papier glacé. Chaque fois qu'on doit ajouter ou retrancher un poids pendant une pesée, on aura soin d'arrêter le fléau, à moins que l'équilibre ne soit obtenu déjà au centigramme près. Le fléau sera abaissé doucement et graduellement : l'équilibre obtenu, on ôtera les poids en les faisant glisser sur une carte et on ne les comptera qu'après les avoir disposés en ordre, à partir du gramme. Les poids ne doivent être maniés qu'à l'aide d'une brucelle.

Toutes les fois qu'on aura à peser un corps qui vient d'être chauffé ou refroidi, on attendra qu'il soit revenu à la température ambiante, sinon on s'exposerait à de graves erreurs, par suite des condensations d'eau et des courants d'air ascendants ou descendants, lesquels rendent impossible toute observation précise.

La sensibilité d'une balance varie avec la température, et sa justesse même peut être compromise, car la dilatation des bras du fléau est le plus souvent inégale. Le simple rayon provenant d'une bougie placée à 1^{m} de la cage peut produire, au bout de sept minutes, un écart du zéro équivalent à celui d'une surcharge de $0^{gr},001$, d'après M. de Jolly.

CHAPITRE II.

OBSERVATIONS FONDAMENTALES.

Ve MANIPULATION.

BAROMÉTRIE.

Théorie.

La colonne mercurielle fait équilibre dans le baromètre à la pression de l'atmosphère : il s'agit d'en mesurer la hauteur en la corrigeant des effets de la température et de la capillarité, afin de rendre les observations comparables.

La réduction du baromètre à zéro se fait en divisant la hauteur H observée par le binôme de dilatation :

$$H_0 = H \frac{1}{1 + 0,000181 t}.$$

Mais on peut écrire approximativement

$$H_0 = H(1 - 0,000181 t),$$

et l'on se contente souvent de retrancher de H le produit de la pression moyenne par $0,000181 t$, soit, pour une station voisine du niveau de la mer, $0,137 t$.

Cette correction suffit si la graduation est tracée sur une règle de bois; mais la dilatation d'une règle métallique altère sensiblement les résultats, qui sont alors trop faibles : il faut les multiplier par $(1 + \lambda t)$, λ étant le coefficient de dilatation de la mesure de longueur.

Pour le laiton...............	$\lambda = 0{,}000019$
» le verre...............	$\lambda = 0{,}000008$

En combinant cette correction avec la précédente, on peut retrancher simplement $0{,}123t$ pour une règle de laiton, ou $0{,}132t$ quand la division est tracée sur le tube de verre même.

Il ne faut pas un grand effort de mémoire pour retenir ces chiffres, et l'usage de ces coefficients est vraiment très pratique. Mais, pour les observations délicates, on ne peut se dispenser de faire le calcul exact; il est alors plus facile de recourir à une Table de réduction semblable à la suivante, qui est empruntée à l'*Annuaire de Montsouris*.

Table de correction pour la réduction du baromètre à zéro.

TEMPÉRATURE du baromètre.	HAUTEURS DU BAROMÈTRE.								
	700	710	720	730	740	750	760	770	780
o	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
10	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
11	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
12	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
13	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
14	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8
15	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9
16	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0
17	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1
18	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3
19	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4
20	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5
21	2,4	2,4	3,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6
22	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8
23	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9
24	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0
25	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1
26	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3
27	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4
28	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5
29	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6
30	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8
31	3,5	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9
32	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0

On trouvera dans les *Instructions pour les observations météorologiques*, publiées par M. Marié-Davy, une Table de réduction plus complète, au $\frac{1}{100}$ de millimètre, de 0° à 32°, entre les pressions de $0^m,690$ à $0^m,780$.

La capillarité entraîne aussi une correction dès que le diamètre du tube est inférieur à $0^m,020$. Cette correction exige évidemment la connaissance de ce diamètre ; les constructeurs l'inscrivent quelquefois sur la tablette de l'instrument. Quand il n'est pas donné, on le déduit approximativement du diamètre extérieur en en retranchant $0^m,0023$ lorsqu'il a de $0^m,008$ à $0^m,010$, et $0^m,0025$ lorsqu'il dépasse $0^m,010$. Il est vrai que la dépression capillaire du mercure ne dépend pas seulement du diamètre du tube, mais encore de la courbure de la surface terminale : c'est pourquoi l'on mesure la flèche du ménisque. M. Delcros a calculé les termes de correction capillaire en fonction de ces deux éléments, en se basant sur les formules de Schleiermacher : voici un extrait de cette Table.

DIAMÈTRE intérieur du tube.	HAUTEUR DE LA FLÈCHE DU MÉNISQUE.							
	mm 0,4	mm 0,5	mm 0,6	mm 0,7	mm 0,8	mm 0,9	mm 1,0	mm 1,2
mm 8..........	0,24	0,30	0,35	0,40	0,46	0,50	0,55	0,64
10..........	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35
12..........	0,07	0,09	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18	0,21
14..........	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12

L'usage de ces Tables est assez limité aujourd'hui, parce que les constructeurs donnent toujours pour les instruments de précision un bulletin de comparaison avec un étalon sûr. La correction constante qu'ils indiquent peut provenir de causes multiples : on la fait subir à toutes les observations, et l'on ne tient plus compte de l'erreur due à la capillarité, parce

qu'elle est comprise parmi les autres. Le baromètre de mon laboratoire, par exemple, doit subir une correction égale à $+0^{mm},486$.

Mais les risques d'un voyage sont fort grands et l'on a toujours à craindre qu'une très petite quantité d'air ou d'humidité ne se soit introduite dans le baromètre.

Arago a indiqué [1] une méthode de vérification très simple : elle consiste à verser dans la cuvette ou à en retirer une certaine quantité de mercure, de manière à faire varier, entre de grandes limites, la capacité de la chambre barométrique; si le baromètre est en bon état, la hauteur doit rester la même; elle varierait, au contraire, si peu que la chambre renfermât d'air ou de vapeur d'eau.

Pour certaines expériences très précises, qui nécessitent la connaissance de la pression absolue de l'atmosphère ou d'un gaz, il convient de faire une dernière correction relative à la variation de l'intensité de la pesanteur avec la latitude et l'altitude. On est convenu de prendre pour pression normale celle qui serait mesurée par une hauteur mercurielle de $0^{m},760$, à la latitude de 45° et au niveau de la mer. Pour éliminer l'influence de la position particulière du baromètre qui a servi à relever la pression, on doit multiplier 760 par le rapport $\frac{G_{45}}{G}$, en désignant par G l'intensité de la pesanteur dans le lieu de l'expérience et par G_{45} l'intensité à la latitude de 45° et au niveau de la mer. Or on a

$$\frac{G_{45}}{G} = \frac{1}{1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,0000002\,H}.$$

φ est la latitude du lieu, H sa hauteur : ces données se trouvent à la page 381 de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes,* pour toutes les villes de France de plus de 10000 habitants.

Description.

Le baromètre de Fortin suffit à tous les besoins de la science.

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXXIII, p. 395; 1826.

Les deux pièces principales, la cuvette et le tube avec son curseur à crémaillère, sont représentées dans les *fig*. 6 et 7 ; les détails en sont connus.

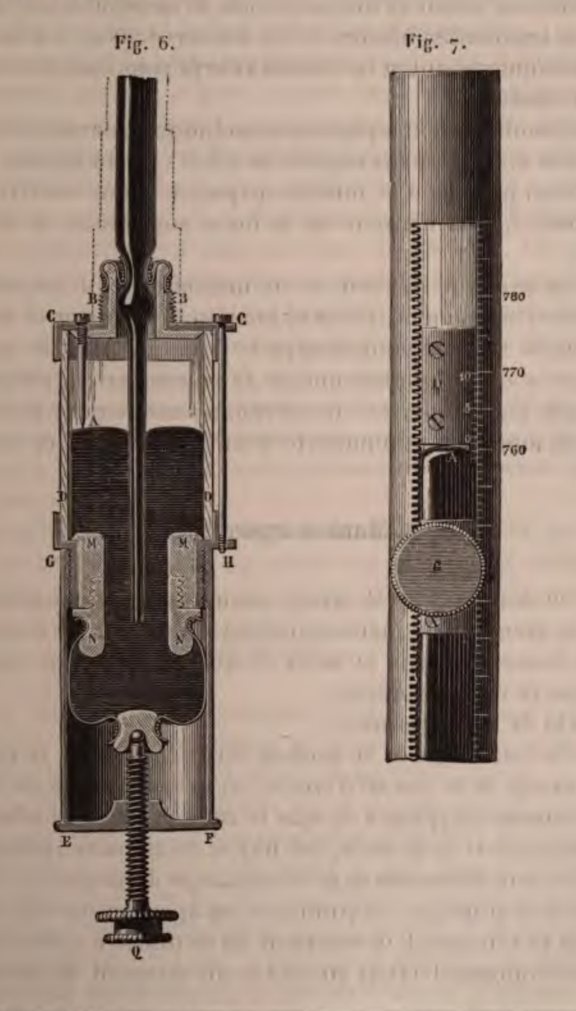


Fig. 6. Fig. 7.

Le tube de laiton porte une graduation dont le zéro correspond à l'extrémité de la pointe d'ivoire, au niveau constant du mercure ; le curseur à vernier D, que l'on fait mouvoir par un

pignon, permet de suivre tous les mouvements du mercure et d'apprécier le $\frac{1}{10}$ de millimètre.

Il est essentiel que l'axe de l'instrument soit vertical, sinon les lectures seraient erronées : on le suspend à une potence et son extrémité inférieure est enserrée dans un anneau à trois vis qui maintient la cuvette dans la position qu'elle a librement choisie.

Le baromètre doit être placé au grand jour, dans une chambre sans feu et à l'abri des rayons du soleil (¹). On facilite l'observation en plaçant une feuille de papier blanc en arrière du baromètre, à la hauteur de la fente supérieure et de la cuvette.

Il est prudent de vérifier les indications du thermomètre fixé sur l'instrument. On fera bien aussi de mesurer de temps en temps la distance qui sépare l'extrémité A de la pointe d'ivoire à un point quelconque de la graduation, au 760ᵉ millimètre, par exemple, car un dérangement peut se produire dans la monture, et il importe d'en être prévenu et de le corriger.

Manuel opératoire.

1° On donne, avec le doigt, quelques petits chocs au baromètre, pour que le mercure puisse surmonter les frottements qu'il rencontre dans le tube et que le ménisque supérieur prenne sa valeur normale.

2° On lit la température.

3° On fait affleurer la surface du mercure de la cuvette à l'extrémité de la pointe d'ivoire, en agissant sur la vis du fond, très lentement, jusqu'à ce que le contact paraisse obtenu. Le mercure est-il trop haut, les objets rectilignes réfléchis à sa surface sont déformés dans le voisinage de la pointe; le mercure est-il trop bas, au contraire, on aperçoit un vide entre la pointe et son image. Il convient de se tourner vers la lumière après avoir amené l'œil au niveau du mercure. M. Marié-Davy

(¹) Pour réduire au minimum l'action du vent, on dispose le baromètre dans une pièce dont les ouvertures sont symétriques par rapport aux différentes directions des courants (*Journal de Physique*, février 1882, p. 66).

conseille de tracer une ligne droite verticale sur le papier blanc qu'on a placé en arrière de la cuvette.

La surface du mercure peut manquer de netteté par suite d'une légère oxydation du métal : l'affleurement est dès lors plus difficile à régler et il faut redoubler d'attention.

4° Pour mesurer la hauteur du mercure, il reste à faire glisser le curseur jusqu'à ce que le plan horizontal mené par le zéro du vernier soit tangent au ménisque, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'œil placé dans le plan des bords antérieur et postérieur du vernier cesse de voir le jour entre ces bords et le sommet de la surface terminale : le moindre mouvement ascensionnel doit faire reparaître un trait continu de lumière. On peut saisir de la sorte une différence de $\frac{1}{10}$ de millimètre : le vernier permet de la mesurer, en notant la position de son zéro sur la graduation du tube et la concordance d'une de ses divisions avec un trait de l'échelle.

Nous avons vu qu'on peut avoir à déterminer la flèche du ménisque : pour cela, il faut abaisser le curseur jusqu'à ce que le zéro soit à la hauteur du cercle de contact du mercure et du verre et noter la différence.

Il reste à effectuer les corrections par le calcul ou par les Tables, en tenant compte du terme de correction relatif à l'instrument.

Résultats.

Je crois intéressant de consigner ici quelques observations de Regnault, relatives au degré de précision qu'on peut atteindre dans l'évaluation des hauteurs barométriques.

« Je ne crains pas d'exagérer, dit-il [1], en posant ce fait, qu'on ne peut répondre d'une mesure barométrique à plus de $\frac{1}{10}$ de millimètre, quelque perfectionnés que soient d'ailleurs les appareils de mesure. La difficulté tient à ce que la pression atmosphérique varie incessamment; mais cette variation n'est accusée immédiatement par le baromètre que par des changements de forme du ménisque, et les variations de hauteur n'ont pas lieu d'une manière continue, mais plutôt par saccades.

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. IV, p. 47.

On a recommandé, pour éviter cet inconvénient, de secouer le baromètre et de faire osciller la colonne mercurielle avant de faire l'observation; mais il est évident qu'on ne parvient pas par ce moyen à écarter complètement la cause d'erreur. »

VIe MANIPULATION.

THERMOMÉTRIE.

Le thermomètre à mercure peut servir aux recherches les plus délicates; il donne des indications très précises, voire même le $\frac{1}{200}$ de degré, à la seule condition d'être soumis à un contrôle préalable et une vérification fréquente de ses points fixes.

Nous allons passer en revue les opérations qui ont pour but l'examen de la graduation, la détermination des points o et 100, et enfin la comparaison avec le thermomètre à air, qui est le seul théoriquement exact : il est indispensable de ne rien négliger dans ces épreuves, car il s'agit ici d'observations fondamentales.

Examen de la graduation. — L'intervalle compris entre deux divisions consécutives de la tige doit correspondre à une capacité mathématiquement constante, sinon la graduation serait nécessairement fausse.

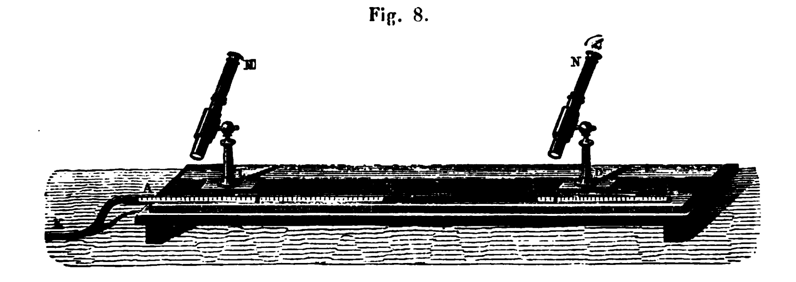
Pour s'assurer de la bonne construction d'un thermomètre, on se sert de la machine à diviser ou bien de l'appareil ci-contre (*fig.* 8), auquel Regnault donnait la préférence; c'est une table de fonte, le long de laquelle peuvent se mouvoir parallèlement l'une à l'autre, dans une même rainure, deux lunettes qui permettent de viser les divisions et de les subdiviser en dixièmes et en cinquantièmes; le thermomètre se place en AB, parallèlement à la rainure et à la règle divisée tracée sur ses bords.

On détache par de petites secousses une colonne de mercure d'environ 20 divisions de longueur, et on la promène le

long du tube, en notant exactement le nombre de divisions occupées par elle; il faut que l'on ne constate pas de différences supérieures à $\frac{1}{10}$ de division.

Pour détacher la colonne mercurielle, on incline le thermomètre à 45°, le réservoir étant en haut, et l'on donne un léger choc : quelquefois la colonne se rompt à la naissance de la tige; dans ce cas on redresse brusquement le thermomètre, pour resouder les deux fragments, et l'on recommence en essayant une nouvelle secousse.

Fig. 8.



Avec de la patience et une certaine pratique, qui ne peut s'enseigner ici, on réussit toujours, quoique plus ou moins vite, à isoler une longueur déterminée de mercure : au besoin on peut chauffer une partie de la tige au chalumeau; souvent encore on constate qu'il existe dans la tige un point où la séparation se produit plus facilement qu'ailleurs; on en profite et, en échauffant ou refroidissant le thermomètre, on limite *ad libitum* le nombre de degrés occupés par l'index. C'est encore par de petites secousses qu'on fait voyager cet index et qu'on amène successivement son extrémité aux environs de 0, 20, 40, 60 ou 100°.

On en mesure chaque fois la longueur en fonction de la graduation de la tige. Il faut toujours s'assurer, après avoir visé les extrémités, que le mercure ne s'est pas déplacé dans l'intervalle de deux observations et qu'il ne s'est pas dilaté par suite d'une variation de température; ce dernier point se constatera en ramenant la colonne dans sa première position et en la mesurant de nouveau.

Cette constatation donne généralement des résultats satis-

faisants; lorsque le thermomètre est signé d'un nom tel que ceux de Baudin, Fastré, Tonnelot, Alvergniat, Salleron, etc., il est très rare qu'on ait à le rebuter.

Cependant le cas peut se présenter et il doit être prévu. Quelques auteurs conseillent alors une Table de correction; on peut en effet calculer une formule empirique ou construire une courbe dans laquelle le nombre de divisions indiqué sur la tige soit exprimé en divisions normales ou en divisions d'un tube idéal parfaitement cylindrique; mais il faut reconnaître que cette solution n'est pas pratique, car elle condamne le physicien à se servir d'un instrument médiocre, et à recourir à une Table, alors qu'il est avéré que nos bons constructeurs savent calibrer et diviser des tubes avec une perfection telle que les erreurs de graduation sont le plus souvent négligeables. Il est plus rationnel et plus simple de se procurer un bon instrument. C'est donc uniquement pour nous assurer des qualités d'un thermomètre que nous le soumettons à une épreuve et nullement pour le corriger.

Détermination des points fixes. — Il faut toujours commencer par le point 100. On se sert du bouilleur à double colonne cylindrique employé par Regnault (*fig.* 9) et l'on suit les variations de la colonne mercurielle à l'aide d'un viseur pour éviter les erreurs de parallaxe. M. Berthelot a fait remarquer [1] que, après avoir atteint un maximum, le liquide s'abaisse ensuite d'une très petite quantité et ne se fixe guère qu'après vingt minutes d'ébullition. Ces phénomènes se présentent même avec des thermomètres construits depuis dix ans, et ils se reproduisent chaque fois que l'on porte l'instrument à 100°, après l'avoir conservé à la température ordinaire pendant quelques mois.

Le réservoir ne sera pas immergé dans l'eau, mais il sera maintenu à $0^m,02$ au moins de la surface du liquide bouillant; il est inutile d'employer de l'eau distillée. Le thermomètre doit être plongé dans le bain de vapeur jusqu'au voisinage du niveau du mercure à 100°, de manière à éviter toute correction.

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4ᵉ série, t. XXIV, p. 120 (1873), et *Journal de Physique*, t. II, p. 18 (1873).

Le manomètre, qui communique avec l'intérieur du vase, permet de constater que la tension de la vapeur est égale à celle de l'atmosphère au moment de l'observation : on relève cette pression au baromètre du laboratoire; la température correspondant à l'ébullition est donnée par les Tables de Regnault (XXXIe M.), ou par la formule $t = 100 + 0,0375\,(H - 760)$, dans laquelle H représente la pression extérieure.


Fig. 9.

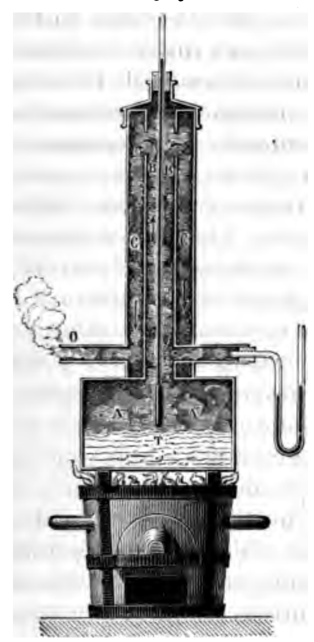
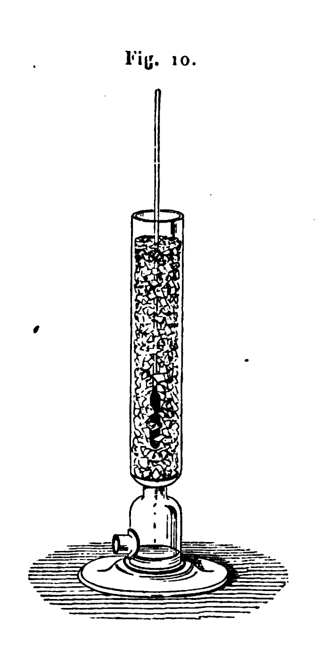


Fig. 10.



L'observation terminée, on enlève le vase du feu et l'on en retire le thermomètre : il est prudent de le suspendre à l'air pendant dix minutes avant de le porter à zéro.

On enfonce l'instrument dans une éprouvette à pied remplie de glace fondante très pure (*fig.* 10), ou mieux encore dans un vase de bois percé de trous à sa partie inférieure, pour que l'eau de fusion puisse s'écouler facilement. Il convient de placer le réservoir du thermomètre au centre du vase

et à une certaine profondeur, de telle sorte que l'eau qui se forme à la surface traverse une couche de glace suffisante pour être ramenée à zéro, car elle se surchauffe de quelques centièmes de degré avec une rapidité surprenante. La glace doit être pilée en fragments de la grosseur d'un pois; la neige a l'inconvénient de se tasser irrégulièrement et il s'y produit des cavités ou des poches d'eau qui sont à une température supérieure à zéro. A l'aide d'une baguette de verre on creuse un trou dans la glace et l'on y introduit le réservoir, sans pression, mais de manière qu'il touche la glace de toutes parts. Les Traités de Physique ont tort de ne pas insister suffisamment sur cette opération, qui est très délicate. M. Berthelot en a signalé les difficultés et il a indiqué les nombreuses précautions dont l'opérateur doit s'entourer. Il recommande même de suspendre le thermomètre et de ne pas le poser, car le propre poids de certains instruments suffit pour déformer le réservoir et fausser l'observation. Quelques secousses seront données au vase, avant de commencer les lectures, qu'on doit poursuivre pendant un quart d'heure environ. Le zéro ainsi déterminé au sortir de l'eau bouillante diffère de quelques dixièmes de celui qu'on marquerait après avoir abandonné l'instrument pendant plusieurs mois à la température ordinaire. M. Pernet (1) a donné au premier le nom de *zéro déprimé* et a démontré qu'il ne variait au plus que de $0^\circ,1$, même dans le cours de plusieurs années. Tous les savants sont d'accord pour affirmer que les observations des points 100 ne sont comparables qu'à celles du zéro déprimé pris immédiatement après. Il faut donc choisir pour distance fondamentale l'intervalle compris entre ces points et en adopter la centième partie pour valeur exacte du degré.

Pour un thermomètre à échelle centigrade dont le point 100 est à $99^\circ,82$ et le zéro consécutif à $0^\circ,38$, le degré vaut $1^{\text{div}},006$. Cette valeur sera soigneusement notée et conservée, car sa connaissance dispense de toute vérification ultérieure du point 100. D'après M. Pernet, on n'a qu'à contrôler de temps en temps le zéro et à garder la valeur du degré précédemment déterminée.

(1) *Journal de Physique*, t. X, p. 520; 1881.

Comparaison des thermomètres. — Grâce aux méthodes de graduation indiquées ci-dessus, des thermomètres de verre à la soude ou de cristal concordent à $\pm 0°,02$ près dans l'intervalle de 0 à 100; il est bon cependant de s'assurer toujours de cette concordance en comparant les instruments avec les étalons et surtout avec le thermomètre à air.

Cette opération se fait avec le comparateur de Regnault, vaste cylindre rempli d'eau ou d'huile et pourvu d'un agitateur. On relève de minute en minute les indications du thermomètre à gaz et l'on note simultanément les températures marquées par tous les instruments soumis à cette épreuve, ena yant soin de produire plusieurs fois de suite des variations de température très rapprochées. Jusqu'à 100° des différences sont toujours faibles; elles passent par un maximum à 50°, mais restent négligeables entre des thermomètres bien construits et récemment contrôlés.

Toutefois l'écart peut atteindre 0°,5 avec le thermomètre à air, qui marque un peu plus que le thermomètre à mercure jusqu'à 100° et notablement moins à partir de cette température. Voici une Table de concordance des indications des deux instruments :

Thermomètres										
A mercure...	0	20	40	60	80	100	150	200	250	300
A air........	0	20,2	40,3	60,3	80,2	100	149,5	198,9	247,6	296,7

Malheureusement cette Table n'a rien d'absolu, elle ne peut donc nous fournir qu'une indication générale, et il faut nécessairement graduer les instruments de précision par l'observation directe du thermomètre à air; chacun d'eux aura donc sa courbe et sa Table spéciale. D'après M. Bosscha, on pourrait se contenter d'une seule comparaison à 50°, pour construire une courbe exacte jusqu'à 120°; les écarts δ à une température t seraient donnés en fonction de l'écart Δ observé à 50° par la formule $\delta = \frac{\Delta}{2500} t\,(100 - t)$. Cette indication est précieuse.

Mesure des températures. — Un thermomètre contrôlé ainsi que nous venons de le dire pourrait donner le $\frac{1}{1000}$ de degré si l'inertie du réservoir de verre ne produisait un mouvement saccadé du mercure; mais on peut relever le $\frac{1}{200}$ et le

regarder comme exact, si toutefois l'on procède correctement à l'application de l'instrument et à la lecture de ses indications.

Pour ce qui est du premier point, il est impossible de formuler aucune règle précise; l'opérateur se gardera surtout de toute influence étrangère à celle du milieu dont il s'agit de mesurer la température, et il protégera le thermomètre par un système d'enceintes convenables contre tous les corps chauds voisins et contre lui-même.

La lecture des thermomètres exige certaines précautions; par exemple, il faut vérifier qu'aucune portion de la colonne mercurielle ne s'est détachée, ce qui arrive parfois et met en défaut les physiciens les plus exercés. Il est bon de donner à l'instrument de petites secousses, pour permettre au mercure de prendre son niveau régulier.

La lecture opérée à l'œil nu expose aux erreurs de parallaxe; on les évite sûrement en se servant d'une lunette et en observant le niveau du liquide à distance; cette disposition présente toute espèce d'avantages, mais elle est si compliquée qu'on y renonce souvent. On peut aussi bien éviter les erreurs de lecture en s'aidant d'un petit miroir qu'on tient derrière le thermomètre : l'œil de l'observateur doit être placé de telle sorte que son image réfléchie se superpose à celle de l'extrémité de la colonne mercurielle.

Quand on est obligé de laisser une partie de la tige du thermomètre à l'extérieur de l'espace dont on cherche la température, on ne peut se dispenser de corriger le degré T observé, en tenant compte de la différence de température des deux parties de l'instrument. Soient t la température de la tige à partir d'une division θ, x la température vraie du corps soumis à l'expérience, et δ le coefficient de dilatation apparente du mercure, que nous prendrons égal à 0,000154; on peut écrire

$$x = \theta + (T - \theta)\,\frac{1 + \delta x}{1 + \delta t}.$$

Cette correction dépasse souvent 1°; dans les expériences très délicates, on entoure quelquefois la tige d'un manchon parcouru par un courant d'eau froide, afin d'enlever toute incertitude sur la valeur de t.

Telle est la suite des opérations régulières et systématiques auxquelles il faut s'astreindre quand on veut observer une température exacte.

VIIe MANIPULATION.

HYGROMÉTRIE.

Théorie.

L'état hygrométrique d'une atmosphère est défini par le rapport qui existe entre la quantité de vapeur qu'elle contient actuellement et la quantité qu'elle pourrait contenir à la même température si elle était saturée. Une série de tubes desséchants permet de déterminer cette fraction de saturation par une pesée et avec l'aide des Tables de Regnault. Mais la longue durée d'une semblable expérience ne permet pas d'appliquer le procédé de l'hygromètre dit chimique aux observations courantes.

Les hygromètres condenseurs qui nécessitent seulement l'observation du point de rosée sur un corps refroidi convenablement sont d'un emploi bien préférable; ils fournissent toujours des résultats parfaitement exacts entre des mains exercées et n'exigent pas une trop longue manipulation.

Les observatoires météorologiques leur ont substitué, il est vrai, les psychromètres, qui se prêtent à l'enregistrement automatique; mais on doit proscrire l'usage de ces instruments dans les laboratoires de Physique, à moins qu'on ne les emploie en fronde : dans ce cas, appelant t et t' les températures des thermomètres sec et mouillé, H la pression atmosphérique, f' la force élastique maximum de la vapeur d'eau à t' degrés et x la force élastique actuelle de la vapeur d'eau de l'atmosphère, on peut appliquer avec sécurité la formule de Doyère

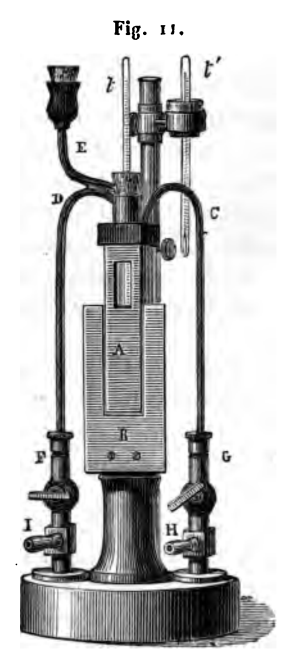
$$x = f' - 0,000687\,\mathrm{H}\,(t - t').$$

Toutefois, le véritable hygromètre des physiciens est l'hygromètre condenseur : il a reçu des formes très diverses depuis que Charles Le Roi l'inventa ; Daniell, Dœbereiner, MM. Desains et Regnault le perfectionnèrent tour à tour. La disposition la plus satisfaisante est celle qu'a adoptée en dernier lieu M. Alluard, directeur de l'Observatoire du Puy-de-Dôme (¹).

Description.

La forme de l'appareil (*fig.* 11) est celle, qu'avait déjà recommandée M. Desains, d'un prisme droit à base carrée, de $0^m,018$ de côté, dont la face plane A est dorée ou argentée et présente le plus brillant poli. Cette face est encadrée dans une lame de même nature qui ne la touche pas.

Fig. 11.



On verse de l'éther dans le cube par l'entonnoir E : deux tubes CG et DF traversent le couvercle de l'appareil et pénètrent l'un jusqu'au fond, l'autre seulement à la partie supérieure du prisme, de manière qu'un courant d'air lancé par le premier tube agite vivement l'éther et soit évacué par le second. Deux petites fenêtres laissent voir l'air barboter dans le liquide.

Une tubulure centrale permet l'introduction d'un thermomètre t qui, se trouvant placé au milieu de l'éther, donne exactement la température à laquelle se fait le dépôt de rosée. Un petit thermomètre fronde t', fixé à côté sur un support de laiton, sert à déterminer avec précision la température de l'air dont on veut avoir l'état hygrométrique.

L'hygromètre de M. Alluard présente le grand avantage de

(¹) *Journal de Physique*, t. VII, p. 329 ; 1878.

rendre le point de rosée nettement visible et très exactement appréciable, par le contraste de deux faces planes voisines qui ne se touchent pas et dont l'une conserve tout son éclat, parce qu'elle est toujours à la température de l'air ambiant.

Manuel opératoire.

1° L'éther étant introduit dans le prisme, on adapte en H un petit soufflet à souffle continu et l'on dispose en I un tuyau de caoutchouc de 1^m ou 2^m de long, afin de reporter à quelque distance les vapeurs d'éther. L'opérateur prend le soufflet à la main et se place en face de l'hygromètre, à 1^m de distance environ, en ayant soin d'éviter toute réflexion de lumière sur les faces dorées, ce qui les fait paraître d'un beau noir d'ébène.

2° Il chasse de l'air à travers l'éther et voit apparaître rapidement le point de rosée; il arrête alors le mouvement du soufflet et attend que la buée ait disparu, puis aussitôt il la fait reparaître.

On réussit sans peine à resserrer entre des limites très rapprochées l'apparition et la disparition du brouillard qui ternit le brillant des faces polies.

3° La température du thermomètre t doit être relevée au moment où la rosée commence et où elle finit; pour cela, l'opérateur s'approche de l'instrument ou bien il se sert d'un viseur : la moyenne des températures sera notée.

4° La température de la salle est déterminée par le thermomètre t', auquel on donne un mouvement de fronde : on aura constaté préalablement que les deux thermomètres employés marchent d'accord.

Il ne reste qu'à consulter les Tables de Regnault; prenant pour tensions actuelles et maxima les tensions maxima aux températures t et t', on en fera le quotient.

Résultats.

Avec l'hygromètre de M. Alluard, de même qu'avec celui de Regnault, il est toujours facile d'observer le point de rosée,

même aux jours les plus chauds de l'été : ce résultat n'est pas toujours atteint avec l'hygromètre Daniell. En hiver, on emploie, au lieu d'éther, un mélange d'alcool ou de glycérine et d'eau.

Cinq minutes suffisent pour toute l'observation, manœuvre et calcul.

Tensions maxima de la vapeur d'eau

(Regnault).

T.	F.	T.	F.	T.	F.	T.	F.	T.	F.	T.	F.
°	mm	°	mm	°	mm	°	mm	°	mm	°	mm
0	4,60	5	6,53	10	9,16	15	12,70	20	17,39	25	23,55
0,5	4,77	5,5	6,76	10,5	9,47	15,5	13,11	20,5	17,93	25,5	24,26
1	4,94	6	7,00	11	9,79	16	13,63	21	18,49	26	24,99
1,5	5,12	6,5	7,24	11,5	10,12	16,5	13,97	21,5	19,07	26,5	25,74
2	5,30	7	7,49	12	10,46	17	14,42	22	19,66	27	26,50
2,5	5,49	7,5	7,75	12,5	10,80	17,5	14,88	22,5	20,26	27,5	27,29
3	5,69	8	8,02	13	11,06	18	15,36	23	20,89	28	28,10
3,5	5,89	8,5	8,29	13,5	11,53	18,5	15,84	23,5	21,53	28,5	28,93
4	6,10	9	8,57	14	11,91	19	16,34	24	22,18	29	29,78
4,5	6,31	9,5	8,86	14,5	12,30	19,5	16,86	24,5	22,86	29,5	30,65

CHAPITRE III.

DENSITÉS.

VIII[e] MANIPULATION.

MÉTHODE DE LA BALANCE HYDROSTATIQUE.

Théorie.

La méthode consiste en une double pesée d'un échantillon du corps, l'une effectuée dans l'air, l'autre dans l'eau; la perte de poids subie dans l'eau P′ est égale au poids du liquide déplacé; elle exprime le volume de l'échantillon par suite des conventions fondamentales de notre système métrique.

Le quotient du poids P du corps par son volume P′, déterminé de la sorte, ne donne qu'une valeur approchée de la densité cherchée : ce résultat devrait subir deux corrections, car, d'une part, c'est à 4° que, sous l'unité de volume, l'eau a un poids égal à l'unité et, d'autre part, les densités sont définies à la température zéro.

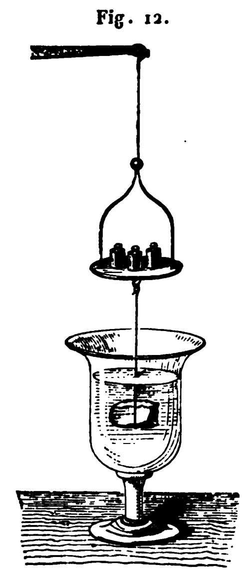
Mais ces corrections deviendraient illusoires dans le cas présent, parce que l'erreur est moindre que le degré d'approximation de l'expérience effectuée à l'aide de la balance hydrostatique des laboratoires.

On se contente généralement de déterminer par cette méthode la densité des corps solides avec une seule décimale, et l'on accepte le résultat brut de l'observation.

Description.

Il est inutile de donner la description de la balance hydrostatique : bornons-nous à signaler que ces instruments permettent tout au plus d'évaluer les centigrammes.

Fig. 12.



Le corps est suspendu par un fil métallique très fin (*fig.* 12) au crochet fixé au-dessous du plateau; ce fil doit être taré à part, mais on se dispense de tenir compte de la perte de poids qu'il éprouve dans l'eau. On prend ce fil simple et bien régulier, de manière à réduire au minimum l'action de capillarité qui introduirait une nouvelle erreur dans l'observation : il est encore bon de le laver préalablement à l'alcool.

Pour éviter les bulles d'air qui adhèrent à la surface des corps, on peut les mouiller d'abord au pinceau avant de les plonger dans l'eau.

Manuel opératoire.

1° Le corps étant suspendu sous le plateau de la balance, on l'équilibre par une tare.

2° On détache le corps, sans enlever le fil, et on le remplace par des poids marqués dont la somme fait connaître le poids P.

3° Le corps est rattaché au plateau, puis immergé; l'équilibre est rompu; on le rétablit par une surcharge de P′ grammes :

$$D = \frac{P}{P'}.$$

Cette méthode permet d'opérer sur de grandes masses, et c'est un précieux avantage, que ne présentent pas les deux méthodes suivantes.

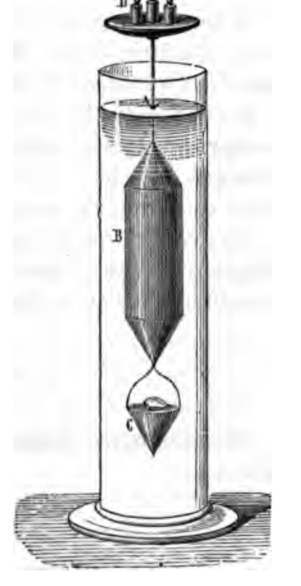
IXe MANIPULATION.

MÉTHODE DE L'ARÉOMÈTRE DE NICHOLSON.

Théorie.

Cette méthode est celle des minéralogistes : sa théorie est la même que celle que nous venons d'exposer pour la balance hydrostatique, car l'aréomètre est en réalité une balance qui permet de peser tour à tour le corps dans l'air et dans l'eau.

Fig. 13.



Ce procédé n'est pas susceptible d'une très grande rigueur : on néglige donc les corrections de température et l'on se contente de calculer le chiffre des dixièmes; le chiffre des centièmes est douteux.

Description.

L'aréomètre de Nicholson (*fig.* 13) est un flotteur cylindro-conique B, de laiton ou de fer-blanc verni, portant à sa partie inférieure une corbeille; il est surmonté d'une tige fine qui soutient un bassin destiné à recevoir la tare et les poids. Placé sur l'eau, ce vaisseau se tient vertical, grâce au lest G de sa corbeille; un instrument ordinaire peut recevoir une surcharge de 20^{gr} à 40^{gr}, et il affleure alors au point A. Habituellement l'étui de l'aréomètre sert de récipient pour l'eau.

Manuel opératoire.

1° Le corps étant placé au milieu du bassin supérieur, on y ajoute de la grenaille en quantité suffisante pour ramener l'affleurement en A.

2° Le corps est remplacé par des poids marqués, ce qui donne son poids P par un procédé analogue à celui de la double pesée.

3° Étant alors transporté dans la corbeille inférieure, le corps perd un poids P′ qu'on détermine en ajoutant en D des poids marqués, jusqu'à ce qu'on arrive à reproduire l'affleurement :

$$D = \frac{P}{P'}.$$

Il faut avoir grand soin de disposer les poids et les charges avec symétrie autour de l'axe de l'instrument, sinon il s'inclinerait et viendrait frotter contre les parois de l'éprouvette.

Enfin il est utile de recommander aux jeunes physiciens de varier progressivement et avec une grande lenteur les surcharges imposées à l'aréomètre, sinon ils s'exposeraient à le faire sombrer; ce danger est surtout à redouter au moment où l'affleurement passe de la pointe conique à la tige effilée, car la diminution subite du cercle de contact fait augmenter considérablement l'attraction capillaire.

Résultats.

Cet aréomètre permet d'opérer sur des fragments d'au plus 15^{cc} à 20^{cc}.

Densités des minéraux

(*Annuaire du Bureau des Longitudes*).

Albâtre gypseux	2,74	Aragonite	2,93
Alumine	4,00	Ardoise	2,77
Ambre	1,08	Blende	4,09
Apatite	3,23	Calcaire grossier	1,94 à 2,06

Corail	2,68	Pyrite de fer	5,02
Diamant	3,52	Quartz	2,65
Émeraude	2,69 à 2,74	Rubis oriental	4,00
Feldspath orthose	2,50 à 2,59	Serpentine	2,49 à 2,66
Fluorine	3,16	Spath d'Islande	2,72
Galène	7,26 à 7,60	Spath fluor	3,19
Grenat	4,18	Spath pesant	4,43
Gypse	2,33	Syénite	2,66
Marbres	2,65 à 2,74	Topaze	3,52
Péridot	3,34	Tourmaline	3,08
Porphyre	2,61 à 2,94	Trachyte	2,75

Xe MANIPULATION.

MÉTHODE DU FLACON POUR LES SOLIDES.

Théorie.

Le poids du corps P se détermine directement; son volume s'obtient en évaluant le poids P′ de l'eau expulsée d'un flacon à contenance invariable par l'immersion du solide.

Ce procédé est le plus précis de tous, parce que, d'une part, les pesées peuvent être effectuées au demi-milligramme, et que, d'autre part, la méthode se prête facilement à toutes les corrections. Regnault a simplifié l'opération en l'exécutant à zéro. Cette température a le double avantage d'être connue avec certitude et de pouvoir être maintenue pendant un aussi long temps qu'il est nécessaire; l'influence de la poussée de l'air reste donc seule à éliminer.

Si nous représentons par t la température à laquelle le solide a été pesé, par δ son coefficient de dilatation cubique, par a le poids de l'unité de volume de l'air au moment de l'expérience, si enfin nous adoptons pour poids spécifique de l'eau à zéro la valeur 0,999878, nous pouvons écrire

$$D = \frac{P}{P'}\, 0,999878 - \frac{P - P'}{P'}(1 + \delta t)\, a.$$

On a de plus

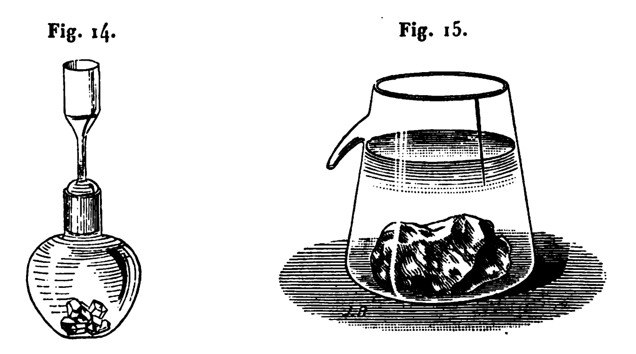
$$a = 1,293 \frac{H - \frac{3}{8}f}{760} \frac{1}{1 + \alpha t},$$

en appelant f la tension de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Description.

Le flacon à densité est en verre mince (*fig.* 14); il est fermé par un bouchon rodé, creux, capillaire sur une partie de sa

Fig. 14. Fig. 15.



longueur, terminé à sa partie supérieure par une petite coupe : un repère est tracé au milieu de la partie capillaire. Sa contenance est de 60^{cc} au plus; son goulot doit avoir $0^{m},008$ au moins de diamètre.

M. Boudréaux a conseillé l'emploi d'un vase de verre conique, à tubulure latérale de déversement (*fig.* 15), qui permet d'opérer sur de très gros fragments du corps à essayer (¹).

Toute balance de précision peut être utilisée, mais on se sert plus avantageusement d'un trébuchet dans les opérations courantes : il suffit que le flacon puisse prendre place entre les fils qui soutiennent les bassins.

(¹) *Journal de Physique*, t. IV, p. 85.

Manuel opératoire.

1° Le flacon est rempli d'eau distillée jusqu'à ce qu'il déborde : puis on enfonce vivement le bouchon; le liquide s'élève jusque dans la cupule supérieure. Aucune bulle d'air ne doit rester attachée au verre. Cela fait, on entoure le flacon de glace : au fur et à mesure que la température diminue, le niveau s'abaisse et descend bientôt dans la partie capillaire. Au bout de quelques minutes, le niveau remonte légèrement, parce que l'eau a dépassé la température du maximum de densité. On attend encore cinq minutes, et l'on enlève, à l'aide d'un petit rouleau de papier buvard, le liquide qui dépasse le trait de repère.

2° Le flacon, ayant été lavé, essuyé et réchauffé à la main, est porté sur le plateau de la balance en même temps que le corps, et l'on fait la tare. Le solide doit être réduit en menus fragments, d'un diamètre moindre que celui du goulot; on aurait tort de le pulvériser, car une poussière se manie difficilement et peut donner lieu à des déperditions de matière.

La tare étant faite, on substitue des poids marqués au corps, ce qui donne son poids P.

3° La même opération est répétée après introduction du corps dans le flacon. L'opérateur veillera à ce qu'aucune bulle d'air ne reste adhérente à la surface du solide ou entre les interstices des fragments. C'est assez difficile à réaliser; je conseille de mouiller d'abord le corps à part dans une petite soucoupe, à l'aide d'un pinceau, puis d'introduire les morceaux un à un. Enfin, pour dernière précaution, on peut faire le vide sur le liquide en le portant sous le récipient de la machine pneumatique. Avec quelques corps pulvérulents par nature ces précautions pourraient encore être insuffisantes, et il ne resterait alors d'autre ressource que de chauffer le flacon.

Les poids qu'il faut ajouter du côté du flacon pour rétablir l'équilibre représentent le poids P' de l'eau expulsée.

Résultats.

Cette méthode est suffisamment exacte pour qu'on puisse poursuivre les calculs jusqu'au chiffre des millièmes.

Voici les résultats de dix expériences effectuées sur un même échantillon d'argent fondu, par plusieurs élèves très soigneux :

Densités observées.	Différence δ avec la moyenne.	δ^2.
10,518..........	+ 0,007	0,000049
10,500..........	— 0,011	0,000121
10,506..........	— 0,005	0,000025
10,519..........	+ 0,008	0,000064
10,507..........	— 0,004	0,000016
10,515..........	+ 0,004	0,000016
10,516..........	+ 0,005	0,000025
10,521..........	+ 0,010	0,000100
10,499..........	— 0,012	0,000144
10,505..........	— 0,006	0,000036
Moyenne. 10,511		$\Sigma\delta^2 =$ 0,000596

L'erreur moyenne (¹) du chiffre 10,511 est donc égale à

$$\sqrt{\frac{0,000596}{10 \times 9}} = \pm\, 0,0026,$$

(¹) Les erreurs d'observations sont de deux espèces. Les unes, *constantes*, se reproduisent dans toutes les observations semblables : telles seraient, dans le cas présent, les erreurs produites par un défaut de justesse de la balance ou par l'emploi d'une eau trop aérée dont la densité serait trop faible, ou encore par la présence de bulles d'air entre les fragments du corps solide. Les erreurs de ce genre ne peuvent pas être soumises au calcul ; tous les soins du physicien doivent tendre à les supprimer, et son devoir est de rejeter absolument des observations qu'il saurait entachées de pareilles inexactitudes.

Mais il y a d'autres erreurs, appelées *accidentelles*, qui se produisent tantôt dans un sens, tantôt dans un autre ; celles-ci sont inévitables et ne suivent aucune règle. Elles proviennent d'un pointé inexact, d'une lecture incorrecte, d'une rigueur d'observation imparfaite, d'un dérangement instantané des instruments de mesure, d'un accident fortuit en un mot. Or il est possible de tenir compte de ces erreurs, et d'en corriger les résultats d'une expérience, en recourant à certaines formules du Calcul des probabilités.

Les auteurs allemands en font couramment usage, et il faut reconnaître qu'ils en tirent un excellent parti. Les formules le plus généralement adoptées par eux reposent sur les considérations qui suivent.

En multipliant les observations, on obtient des résultats dont la moyenne s'approche indéfiniment de la valeur véritable. Si donc n représente un très grand nombre, la moyenne M de n observations pourra être regardée comme

et l'erreur probable sera représentée par

$$0,6745\sqrt{\frac{0,000596}{10\times 9}}=\pm\,0,0017.$$

On peut donc parier cent contre cent que la densité de l'échantillon considéré est comprise entre 10,5093 et 10,5127 : cette concordance avec le chiffre donné par les Tables, 10,512, témoigne de l'exactitude qu'on peut atteindre par la méthode du flacon, dans un laboratoire d'enseignement.

Densité des solides

(*Annuaire du Bureau des Longitudes*).

Acier trempé	7,816	Nickel fondu	8,28
Aluminium fondu	2,56	Or fondu	19,26
Antimoine	6,72	Phosphore	1,83
Argent fondu	10,512	Platine martelé	21,70
Bismuth fondu	9,82	Plomb	11,35
Crown	2,447	Sélénium	4,30
Cuivre laminé	8,95	Soufre octaédrique	2,07
Étain fondu	7,285	Soufre prismatique	1,975
Fer forgé	7,79	Verre de Saint-Gobain	2,49
Flint de Guinand	3,589	Zinc fondu	6,862
Maillechort	8,615		

Nota. — Certains corps absorbent l'eau dans leurs pores: tels sont les bois, la craie, certains minéraux, etc.

---

une valeur très approchée de la quantité qu'on mesure. Appelons δ les différences positives et négatives entre M et les diverses valeurs observées et faisons la somme $\Sigma\delta^2$ des carrés de ces différences. L'erreur moyenne du nombre M est égale à

$$\pm\sqrt{\frac{\Sigma\delta^2}{n(n-1)}},$$

et l'erreur probable est égale à

$$\pm\,0,6745\sqrt{\frac{\Sigma\delta^2}{n(n-1)}}.$$

Ces formules sont d'une application facile et elles ont le grand avantage d'indiquer le nombre de décimales exactes qu'on peut calculer dans une moyenne.

Pour ces substances très poreuses, il y a ambiguïté dans l'expression du volume, car on peut considérer le volume extérieur du fragment, ou bien son volume réel, lequel est égal au volume apparent diminué du volume des pores. Il y a donc deux densités que l'on appelle l'une *apparente*, l'autre *absolue*. La première se détermine en couvrant le corps d'un vernis imperméable pour empêcher l'absorption de l'eau; pour la seconde, on mesure le volume des interstices en pesant le corps d'abord sec, puis imbibé d'eau. La différence des poids exprime le poids de l'eau qui remplit les pores et partant le volume de ces pores. Le volume réel de la matière s'obtient dès lors par soustraction.

Densité des corps poreux

(d'après Buignet).

	DENSITÉ	
	apparente.	réelle.
Craie	1,600	2,551
Carbonate de magnésie	1,293	2,966

La densité des corps solubles dans l'eau se détermine par l'intermédiaire d'un liquide de densité connue dans lequel le solide soit insoluble : on s'adresse le plus souvent à l'essence de térébenthine ou à une huile bien raffinée.

Mais la densité des corps solubles varie d'un échantillon à l'autre, par suite des différences de structure et d'agrégation qu'ils présentent; voici quelques chiffres obtenus par des expérimentateurs très recommandables.

Densité des corps solubles

(d'après Buignet).

Sucre candi	1,606
Chlorure de sodium	2,240
» de potassium	1,994
Hyposulfite de soude cristallisé	1,670
Sulfate de chaux	2,331
» de fer	1,904
» de soude	1,520

XIe MANIPULATION.

MÉTHODE DU Dr MOHR.

Théorie.

On se sert, dans les laboratoires allemands, pour déterminer la densité des liquides, d'une balance hydrostatique d'un modèle spécial, connue sous le nom de *balance du Dr Mohr*.

Son emploi repose encore sur le principe d'Archimède; on détermine le rapport des pertes de poids d'un même corps dans le liquide proposé et dans l'eau : ce rapport est la densité cherchée. Mais l'opération est considérablement simplifiée, grâce à un artifice du constructeur qui supprime l'épreuve faite dans l'eau et réalise l'équilibre par le déplacement d'une masse le long du fléau, comme dans la balance romaine.

Un bassin-tare (*Tara-Schale*) fait équilibre dans l'air à un plongeur de verre : vient-on à immerger le plongeur dans l'eau distillée à 15°, le fléau s'incline du côté de la tare, et il faut, pour rétablir l'équilibre, charger le bras opposé d'un poids égal au poids de l'eau déplacée : un cavalier s'accroche à cet effet à l'extrémité du fléau.

Or, si le plongeur était enfoncé dans un liquide dont la densité serait égale à $\frac{1}{1000}$, il faudrait un poids 1000 fois moindre pour rétablir l'équilibre, ou bien le bras du fléau, chargé du même poids, devrait être raccourci et réduit au $\frac{1}{1000}$ de sa longueur; pour une densité égale à $\frac{n}{1000}$, on le réduirait aux $\frac{n}{1000}$ de sa longueur. Il n'y a donc qu'à chercher à quelle distance du point de suspension il faut placer le cavalier pour connaître la densité du liquide au millième près. Pour les liquides plus denses que l'eau, on devra disposer de deux cavaliers égaux, dont l'un restera suspendu à l'extrémité du fléau et l'autre sera placé à cheval sur le bras, à la distance voulue.

L'équilibre étant établi, on lit sur le fléau la densité du liquide; il n'y a eu qu'une seule pesée à faire. Mais la gradua-

tion du bras du fléau au millième eût présenté des difficultés que le constructeur a évitées fort habilement en limitant la division au dixième et en mettant à la disposition de l'opérateur deux autres cavaliers dont le poids est égal au dixième et au centième de celui qui équilibre la poussée subie par le flotteur dans l'eau. Le résultat est évidemment le même.

Description.

La balance de Mohr (*fig.* 16) ne présente d'autre disposition particulière que la division du fléau en 10 parties égales par

Fig. 16.

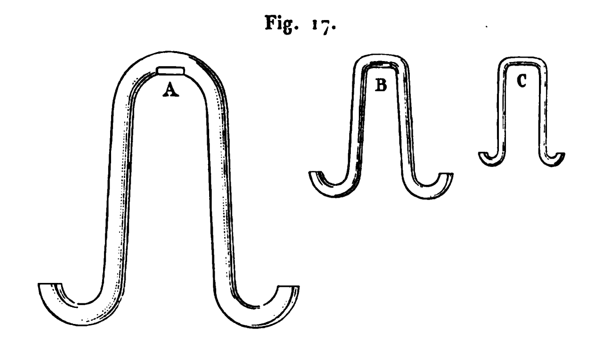


des crans numérotés de 1^{mm} de profondeur environ. Les cavaliers A, B et C (*fig.* 17) ont la forme d'un Ω qui permet égale-

ment bien de les placer sur les bras de la balance ou bien de les accrocher l'un à l'autre, s'ils doivent tous les trois occuper le même cran.

Le plongeur est cylindrique et contient un thermomètre

Fig. 17.



pour lest, car l'épreuve doit être nécessairement faite à 15°, température à laquelle le poids du grand cavalier est égal à la poussée de l'eau sur le flotteur. Enfin l'éprouvette a une capacité d'environ 100^{cc}; elle doit être entièrement remplie de liquide.

Manuel opératoire.

1° Le liquide étant à la température de 15°, on y immerge le plongeur en abaissant le fléau.

2° On cherche d'abord à rétablir l'équilibre à l'aide du premier cavalier A; le plus souvent sa position exacte ne correspond à aucun des points. On le place alors au cran le plus voisin, vers le centre, et on lui adjoint le deuxième cavalier B dans les mêmes conditions, puis le troisième, C, qui doit amener le fléau dans le plan horizontal. Lorsque la densité du liquide est plus grande que l'unité, l'équilibre exige qu'on suspende un cavalier identique au premier à l'extrémité du fléau.

3° La lecture se fait en prenant pour chiffre des unités le nombre de cavaliers A suspendus à l'extrémité du fléau et pour chiffre des dixièmes, des centièmes et des millièmes les numéros des crans qui correspondent aux cavaliers A, B et C.

Résultats.

L'opération que nous venons de décrire permet de déterminer une densité en quelques minutes avec une précision remarquable. Nous recommandons seulement de laver à l'alcool le fil de platine qui soutient le plongeur et de veiller à ce qu'il soit bien rectiligne, sans nœud ni pli.

Il est évident que les cavaliers n'ont aucune valeur par eux-mêmes et qu'ils tombent en rebut, ainsi que le bassin-tare, si le plongeur vient à être brisé.

C'est le plus grand inconvénient de cette ingénieuse balance spécifique.

XII[e] MANIPULATION.

MÉTHODE DE L'ARÉOMÈTRE FAHRENHEIT.

Théorie.

Un corps flottant à la surface d'un liquide s'y enfonce d'une quantité telle, que le poids du liquide déplacé soit égal au sien.

C'est le principe sur lequel est fondé l'emploi de tous les aréomètres, à poids constant ou variable.

Ces instruments pourraient être très précis, n'était l'action de capillarité qui modifie les phénomènes : la première condition de l'usage régulier des aréomètres est en effet qu'ils soient bien mouillés par le liquide et qu'il y ait au-dessus du point d'affleurement une couche liquide collée à ses parois; c'est par cette couche adhérente que s'exerce, suivant des lois constantes, la force capillaire qui tend à faire plonger le flotteur plus que ne l'indique le principe d'Archimède. Mais, d'après M. Duclaux, une trace de graisse sur la tige suffit pour modifier l'affleurement normal; c'est pourquoi j'ai déjà recom-

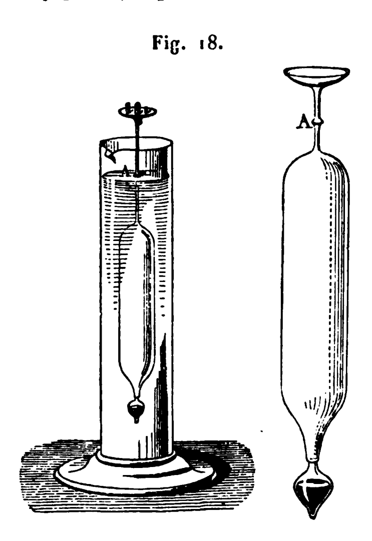
mandé dans les manipulations précédentes de laver à l'alcool les fils auxquels les corps étaient suspendus; cette recommandation est bien plus nécessaire pour les aréomètres de Fahrenheit et autres, qui peuvent être immergés dans des liquides mouillant difficilement le verre. L'opérateur devra, en outre, commencer par enfoncer l'instrument au delà du point d'affleurement, de manière à humecter la tige de verre sur toute sa longueur.

Dans les mesures de densités faites à l'aide de l'aréomètre de Fahrenheit, il n'y a pas lieu d'effectuer de correction relative à la température de l'eau; le chiffre des dixièmes peut seul être considéré comme exact.

Description.

Cet aréomètre (*fig.* 18) à poids variable est en verre : c'est

Fig. 18.



un flotteur lesté par du mercure ou du plomb, surmonte d'une tige effilée portant un petit plateau; un repère A est marqué à mi-hauteur de la tige.

Le poids de l'instrument est gravé sur le verre. Nous le désignerons par la lettre P.

Manuel opératoire.

1° L'aréomètre, soigneusement lavé, est plongé dans le liquide à essayer : il faut p grammes pour déterminer l'affleurement.

2° L'instrument ayant été de nouveau lavé et essuyé est porté dans l'eau distillée, marquant la même température que le liquide. L'affleurement est produit par une charge de p' grammes :

$$D = \frac{P+p}{P+p'}.$$

XIIIe MANIPULATION.

MÉTHODE DU FLACON POUR LES LIQUIDES.

Théorie.

On pèse deux volumes égaux de liquide et d'eau à zéro. La formule exacte qui donne la densité corrigée de l'influence de la poussée est la suivante :

$$D = \frac{P}{P'}\,0,999878 - \frac{P(1+\delta' t)a - P'(1+\delta t)a}{P'},$$

dans laquelle P et δ, P' et δ' sont les poids et les coefficients de dilatation du liquide et de l'eau et t la température de l'air ambiant dont l'unité de volume a un poids a; mais on néglige d'ordinaire les variations des pertes de poids éprouvées dans l'air par réchauffement pendant les pesées, et l'on écrit simplement

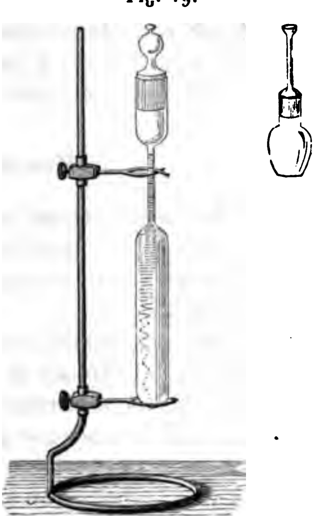
$$D = \frac{P}{P'}\,0,999878 - \frac{P-P'}{P'}a.$$

Description.

Le flacon que nous avons employé pour les solides peut encore servir pour les liquides; cependant Regnault a recom-

mandé un modèle un peu différent. Il est formé d'un réservoir (*fig.* 19), surmonté d'un tube capillaire au milieu duquel est tracé le repère, et d'une autre partie cylindrique, servant d'entonnoir; un bouchon de verre empêche l'évaporation des liquides pendant les pesées.

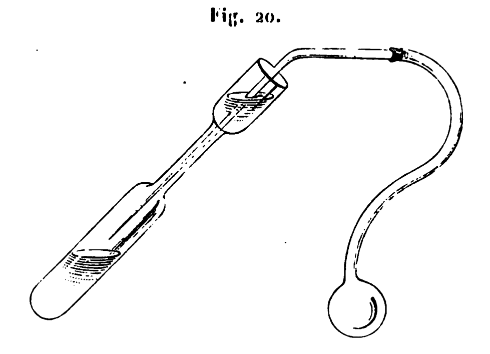
Fig. 19.



Le remplissage de ces flacons est assez laborieux; il faut opérer comme pour un tube thermométrique. On chauffe d'abord le réservoir à la main ou bien sur une flamme et l'on remplit l'entonnoir de liquide; le refroidissement le fait descendre dans la partie inférieure de l'instrument; on achève l'opération en chauffant jusqu'à l'ébullition.

Pour les liquides que l'on ne peut porter à l'ébullition, on procède de la manière suivante : on introduit dans le flacon l'extrémité très effilée d'un tube de verre étiré à la lampe

Fig. 20.



(*fig.* 20). En exerçant par ce tube une aspiration, soit à l'aide de la bouche, soit à l'aide d'une poire en caoutchouc, on voit le liquide se précipiter dans le flacon. Le même tube sert

à faire disparaître les bulles d'air et à amener le niveau à coïncider avec le trait de repère; enfin il permet de vider très rapidement le flacon en y insufflant de l'air.

Il est toujours difficile de laver les flacons et de les dessécher; à ne considérer que ce point, il est bien préférable d'employer les flacons à large goulot, surtout pour certains liquides adhérents aux parois de verre.

Manuel opératoire.

1° Le flacon vide et sec est placé dans un des plateaux de la balance avec un nombre de grammes supérieur au poids du liquide qu'il peut contenir, soit 100gr : on fait la tare dans l'autre plateau.

2° Le flacon ayant été rempli à zéro du liquide dont on veut connaître la densité, on le replace sur la balance après l'avoir réchauffé, et l'on détermine le nombre de grammes p qu'il faut mettre à la place des 100gr pour faire équilibre à la même tare que ci-dessus. Le poids du liquide P est égal à $100 - p$.

3° On vide le flacon, on le lave plusieurs fois à l'eau distillée, et on le reporte plein d'eau sur le plateau. Soit p' le poids qui rétablit l'équilibre; le poids P′ du liquide est exprimé par $100 - p'$.

$$D = \frac{100 - p}{100 - p'}.$$

Résultats.

Acide chlorhydrique $HCl, 6HO$	1,208
» nitrique AzO^5, HO	1,520
» » $AzO^5, 4HO$	1,42
» sulfurique SO^3, HO	1,848
Sulfure de carbone	1,263
Essence de térébenthine	0,864
Huile d'olives	0,915
Alcool absolu	0,795
Éther	0,730
Benzine	0,89
Mercure	13,596

XIVᵉ MANIPULATION.

MÉTHODE DU VOLUMÉNOMÈTRE.

Théorie.

Il n'est pas toujours possible de mettre en contact avec un liquide les substances dont on cherche la densité : c'est ce qui arrive pour un grand nombre de matières organisées, telles que la fécule, les fibres ligneuses, etc., et pour certaines matières fabriquées analogues à la poudre de guerre.

Le capitaine Say a proposé dans ce cas de déterminer le volume des corps en mesurant celui de l'air qu'ils déplacent.

Une capacité V étant remplie d'air sous une pression H, on y introduit la substance dont nous représenterons le volume par x; l'air occupe donc un volume $V - x$. Qu'on augmente ou qu'on diminue ce volume de v, sa pression devient alors $H \mp h$, et l'on a, dans le premier cas,

$$x = V - v\,\frac{H - h}{h}$$

et, dans le second,

$$x = V - v\,\frac{H}{h}.$$

Ces deux procédés, par dilatation ou par compression, peuvent être employés concurremment : les résultats se vérifieront l'un l'autre.

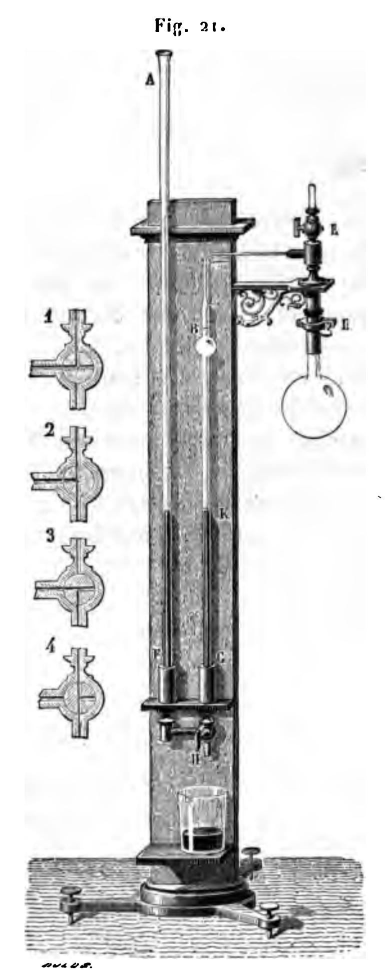
Description.

Regnault (¹) a composé un voluménomètre très simple, en adaptant un ballon de verre à son manomètre bien connu, à l'aide d'un collier à gorge D (*fig.* 21).

(¹) *Annales de Chimie et de Physique*, 3ᵉ série, t. XIV, p. 207; 1845.

Le robinet à trois voies H permet dans la position 1 de faire communiquer les deux branches du manomètre ; dans la position 2, le mercure s'écoule des deux branches simultanément; dans les positions 3 et 4, de l'une ou l'autre seulement.

Fig. 21.



Le renflement B de la branche fermée a un volume *v* entre les deux traits de repère tracés sur le verre; le volume V est celui du ballon, augmenté de celui du tube jusqu'au premier trait de repère. Regnault jaugeait *v* et V en pesant très exactement le mercure renfermé dans ces capacités : pour *v* l'opération s'exécute facilement en plaçant le robinet dans la position 4; pour V elle est plus compliquée, mais n'est à faire qu'une fois. Les valeurs trouvées doivent être gravées sur l'instrument au centième de centimètre cube près.

L'observation des pressions se fait au cathétomètre.

Manuel opératoire.

1° La substance est introduite dans le ballon, qu'elle doit remplir à moitié; il en faut donc au moins de 100^{cc} à 150^{cc}. En pesant le ballon avant et après, on aura le poids de la matière soumise à l'expérience. On adapte le ballon à l'appareil, en veillant à ce que la rondelle de cuir qui forme joint soit bien grasse, et l'on serre le collier à re-

fus. Le robinet supérieur du voluménomètre E reste ouvert.

2° On verse du mercure dans le manomètre par la branche ouverte, jusqu'à ce que les deux colonnes soient bien de niveau à la hauteur du trait supérieur; après avoir attendu un instant, pour que l'équilibre de température et de pression s'établisse dans l'appareil, on ferme le robinet E.

3° L'opérateur fait couler le mercure, en plaçant le robinet H dans la position 2, jusqu'à ce que le niveau dans la branche fermée soit à la hauteur du second trait de repère; puis il mesure la différence de niveau h entre les deux colonnes et prend la hauteur H du baromètre : il possède donc toutes les données de l'expérience.

4° On peut obtenir immédiatement une nouvelle valeur de x en ouvrant le robinet E qui communique avec l'atmosphère et versant du mercure dans le manomètre jusqu'à ce que le niveau s'établisse à la hauteur du trait inférieur de repère. On referme alors le robinet E et l'on ajoute du mercure de manière à atteindre de nouveau le premier trait. La pression est alors devenue supérieure à l'atmosphère d'une quantité h.

Il faut toujours opérer sur une substance parfaitement sèche : elle peut être desséchée dans le ballon lui-même. Quand la matière est hygrométrique, il convient de remplir entièrement le manomètre de mercure, avant d'adapter le ballon, et de mettre le tube E en communication avec un appareil rempli de chlorure de calcium.

Résultats.

Un certain nombre de substances jouissent de la propriété d'absorber les gaz avec une énergie variable avec la pression : il en résulte que la même masse gazeuse ne reste pas constante et que dès lors on ne peut appliquer la loi de Mariotte ; l'erreur peut atteindre $\frac{1}{20}$ du volume à mesurer. Dans ce cas, le voluménomètre n'est pas applicable; mais on reconnaît infailliblement les substances pour lesquelles cette action perturbatrice se produit à deux signes : d'abord les procédés par compression et dilatation donnent des résultats différents; en

second lieu, la pression change dans l'appareil avec le temps. Ces remarques sont de Regnault.

La méthode voluménométrique présente malheureusement un autre défaut : c'est qu'il est fort difficile de maintenir la température constante pendant toute la durée de l'observation. Or une différence de 1° entraîne une variation de pression de $0^m,002$ et cette différence peut causer une erreur de 2^{cc} sur la détermination du volume.

Néanmoins, en opérant dans une pièce à température constante, avec une grande rapidité, il est possible d'obtenir des résultats corrects. Les densités suivantes sont empruntées à des travaux très estimés de MM. Grassi et Buignet.

Fécule de pomme de terre	1,50
Poudre d'amidon	1,53
Coton	1,95
Laine	1,61
Lin	1,79
Acide oxalique	1,63
Alun de potasse	1,76
Chlorure de sodium	2,14
Azotate de plomb	4,23
» de baryte	3,40
Chlorate de potasse	2,32
Poudre à canon	2,08

CHAPITRE IV.

DILATATIONS.

XV[e] MANIPULATION.

CONSTRUCTION D'UN THERMOMÈTRE.

La construction d'un thermomètre à mercure comprend quatre opérations : la purification du mercure, le choix et le calibrage du tube, son remplissage et sa graduation.

Purification du mercure. — Le mercure du commerce contient des métaux étrangers, zinc, cuivre, plomb, étain, arsenic et leurs oxydes; à cet état, il adhère au verre, fait la queue et laisse des traces de son passage dans les tubes qui le renferment.

Pour le purifier, on le traite d'abord par l'acide nitrique étendu de 2 fois son volume d'eau, à une température de 50° pour faciliter la réaction. Le mercure est introduit dans un petit flacon, avec environ $\frac{1}{10}$ de son volume d'eau acidulée, et on le chauffe au bain-marie pendant une heure au moins, en l'agitant très souvent; puis on le laisse reposer quelques jours. Il se produit de l'azotate de mercure; mais, comme le mercure est précipité de ses solutions par tous les métaux, il est régénéré en grande partie, tandis que tous les amalgames passent à l'état de sels solubles qu'on peut éliminer par un lavage.

On ajoute donc de l'eau dans le flacon et l'on agite vivement; puis on verse le mercure dans un grand cristallisoir, de manière qu'il forme une couche de $0^m,01$ à $0^m,02$ au plus, et

on le soumet à l'action continue d'un courant d'eau qui entraîne tous les azotates; on termine ce lavage à l'eau distillée.

Il ne reste plus qu'à dessécher le mercure ; or il faut craindre de l'oxyder. Le mieux est d'absorber grossièrement l'eau par des feuilles de papier buvard, de filtrer le mercure à travers une feuille de papier glacé, percée d'un trou d'aiguille, puis de le porter dans le vide, où il sera abandonné quelques heures, sous faible épaisseur, en présence de l'acide sulfurique concentré.

Ce procédé donne de bons résultats. Cependant, quand on se propose de construire un thermomètre très sensible, à tige finement capillaire, il est prudent d'employer la méthode d'Ulex, modifiée par M. Wild. Dans un flacon de 2^{lit}, renfermant au plus $0^{\text{lit}},1$ de mercure, on introduit 30^{gr} d'une solution de perchlorure de fer contenant, pour 3 parties en poids d'eau distillée, 1 partie de sel desséché. Le mercure fortement secoué se réduit en poussière; on lave à l'eau à plusieurs reprises en agitant à chaque fois, et l'on verse ensuite la bouillie qui s'est formée dans une capsule de porcelaine. On la dessèche entièrement au bain-marie, puis on la triture dans un mortier de porcelaine pour rendre au mercure sa fluidité. Il n'y a plus qu'à laver comme ci-dessus.

Choix et calibrage du tube. — On trouve chez les souffleurs de verre des tubes thermométriques tout préparés, qui portent à leur partie supérieure une ampoule en forme d'olive dont l'ouvrier a étiré et fermé l'extrémité, pour que les poussières et l'humidité n'y pénètrent pas : on en doit briser la pointe au moment de se servir du tube.

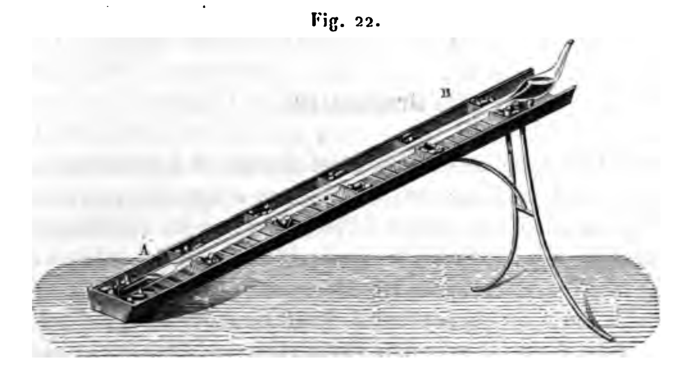
L'opérateur commence par choisir un tube capillaire et il l'examine soigneusement pour s'assurer qu'il ne présente aucune irrégularité, grain de sable ou autre défaut. Ce tube devrait avoir une section intérieure absolument constante, de manière que des longueurs égales prises sur la tige pussent correspondre à des capacités intérieures égales entre elles; mais cette rigueur mathématique est rare, car tous les tubes présentent une certaine conicité, et il faut se contenter généralement d'une exactitude approchée dans le calibre.

Un tube peut être accepté si une colonne de mercure d'environ $0^{\text{m}},02$ occupe sensiblement la même longueur dans

toutes ses parties : on mesure ces longueurs au demi-millimètre et l'on se contente de cette approximation, car la division tiendra compte d'une légère variation du diamètre. Il faudrait rejeter un tube qui présenterait une différence plus sensible.

Remplissage. — Pour introduire le mercure dans le thermomètre, on en brise l'extrémité et, après avoir chauffé légèrement le réservoir et l'ampoule sur une lampe à alcool pour dilater l'air intérieur, on renverse l'instrument, la pointe dans le mercure : l'air se contracte par le refroidissement, la pression diminue et une certaine quantité de mercure monte dans l'ampoule. On redresse alors le tube et l'on chauffe de nouveau

Fig. 22.



le réservoir; le mercure pénètre dans la tige capillaire et il suffit de recommencer plusieurs fois cette opération pour que le réservoir se remplisse peu à peu. Pour finir l'opération, il est nécessaire de chauffer enfin le réservoir jusqu'à faire bouillir le mercure qui y a pénétré : la vapeur produite balaye la dernière trace d'air et sa condensation détermine ensuite le remplissage complet de l'instrument. Il est rare que ce résultat soit atteint du premier coup; aussi emploie-t-on avantageusement un gril incliné AB (*fig.* 22) qui permet de chauffer le verre dans toute sa longueur et de faire bouillir le liquide plusieurs fois de suite jusqu'à ce que la dernière bulle d'air ait été expulsée. Il faut avoir grand soin de ne pas laisser refroidir le mercure de l'ampoule, sinon le tube chaud se briserait au moment de la descente du métal.

Il s'agit encore de règler la course du mercure avant de fermer le tube : après avoir détaché d'abord l'ampoule par étirement du verre sur une lampe d'émailleur, on chauffe le réservoir jusqu'à la température maximum que doit marquer le thermomètre. L'excès de mercure s'écoule par la pointe effilée : on laisse la température s'abaisser légèrement et l'on ferme le tube en dirigeant le dard du chalumeau sur la pointe.

Une très petite quantité d'air a donc pénétré dans le tube, et c'est nécessaire, sinon la colonne de mercure se briserait chaque fois que le thermomètre serait retourné; mais il est bon de ne pas laisser trop d'air au-dessus du mercure, car il pourrait diviser la colonne, et l'instrument serait compromis.

Graduation.

Les points fixes se déterminent comme il a été dit dans la sixième manipulation; on les marque soigneusement sur le tube en traçant deux points à l'encre grasse ou au diamant.

Cela fait, on recouvre le verre d'une couche mince d'un vernis transparent, car les repères doivent rester visibles.

Le meilleur vernis est celui dont se servent les aquafortistes; il est fluide et présente l'avantage de ne point se craqueler sous l'action du tracelet; on le trouve dans le commerce.

Les trois formules suivantes donnent aussi de bons résultats :

	Parties.
Cire jaune	4
Essence de térébenthine	1

Ce vernis fond à une douce chaleur et s'enlève facilement.

	Parties.
Résine mastic	15
Huile d'aspic	4
Essence de térébenthine	7

Alcool à 96°	100^{cc}
Résine mastic	8^{gr}
Cire	6^{gr}

Pour diviser en 100 parties d'égale capacité l'intervalle compris entre le zéro et le point 100, on est obligé de procéder de la manière suivante :

On plonge le réservoir seul dans un bain d'eau à 50°, puis on donne un léger coup de chalumeau à la hauteur du zéro; de la sorte, on réussit à détacher la colonne qui va de 0 à 50. Le thermomètre ayant repris la température de l'air ambiant, on mesure la longueur L de l'index resté en place, à la machine à diviser, puis on le fait glisser dans le tube jusqu'à ce que son extrémité supérieure affleure au point 100 et l'on effectue une nouvelle mesure L'. Ces deux longueurs ne seront pas rigoureusement égales; il faudra donc diviser la longueur 0 — 100 en deux parties proportionnelles à L et L' pour trouver la position exacte du point 50. Le plus souvent cette opération suffit; cependant il est quelquefois nécessaire de déterminer de même la position des degrés 25 et 75.

On se donne de la sorte des repères dont on pourra diviser les intervalles en 50 ou 25 parties d'égale longueur : c'est un problème que nous avons déjà résolu dans la première manipulation.

La division étant prolongée par les mêmes procédés sur toute la longueur de l'instrument, on trace sur le vernis avec un poinçon les chiffres qui correspondent aux dizaines de la division, et l'on expose le tube, dans une boîte de plomb, à l'action de la vapeur d'acide fluorhydrique : il faut avoir soin de recouvrir préalablement de vernis toute la surface du thermomètre. On le laisse exposé à la vapeur corrosive de l'acide une vingtaine de minutes, si les traits doivent être assez bien marqués pour être vus sans l'emploi de lunettes, et dix minutes seulement si la division doit être observée à l'aide d'un viseur; les traits sont, dans ce cas, beaucoup plus déliés. On termine l'opération par un lavage à l'alcool pour enlever le vernis.

La gravure ainsi obtenue est d'un blanc mat; l'acide liquide produit au contraire un tracé moins fin, dont le fond est poli et brillant, et qui est par là même peu net et souvent difficile à apercevoir.

Quelquefois on emploie la pointe de diamant pour attaquer le verre : les traits obtenus de la sorte sont larges, inégaux et ils nuisent à la solidité du thermomètre.

Quel que soit le mode de gravure auquel on ait donné la préférence, il est utile de noircir la graduation en passant sur la surface du verre un vernis coloré qui pénètre dans les traits et résiste après dessiccation à l'action de l'eau.

La construction d'un thermomètre entrait nécessairement dans le cadre de nos travaux pratiques et nous devions insister sur tous les détails de l'opération; mais cet exercice, plein d'enseignements pour l'élève, n'est pas pour lui d'une utilité immédiate, car le physicien se repose, pour la confection des instruments de précision, sur l'habileté des constructeurs spéciaux, qui ne peut être égalée.

XVIe MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA DILATATION LINÉAIRE PAR LA RÈGLE DE BORDA.

Théorie.

Cette méthode permet très simplement de déterminer la différence des coefficients de dilatation linéaire de deux corps.

Deux règles, de même longueur l_0 à 0°, diffèrent à t degrés d'une longueur δ qui est donnée par la formule

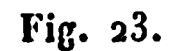
$$\delta = t l_0 (\lambda - \lambda'),$$

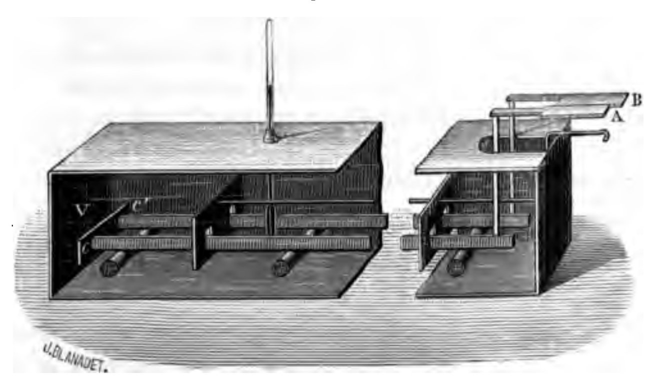
dans laquelle λ et λ' sont les cofficients de dilatation linéaire. Borda prenait t pour l'inconnue de cette équation; Dulong et Petit la résolvaient au contraire pour $(\lambda - \lambda')$, non point dans le but de déterminer les coefficients exacts des divers corps, mais plutôt pour trouver les lois de la dilatation des métaux [1]. C'est ce que nous ferons à leur exemple dans cette manipulation.

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. II, p. 254; 1816.

Description.

Deux règles métalliques (*fig.* 23) d'un mètre de longueur environ, présentant une section de $0^m,025$ sur $0^m,006$, sont disposées l'une à côté de l'autre et reliées d'une manière invariable à une de leurs extrémités par une forte traverse V. A l'extrémité opposée sont appliquées des colonnes de laiton qui soutiennent une échelle A divisée en cinquièmes de mil-


Fig. 23.



limètre et un vernier B marquant les vingtièmes de division de l'échelle; ce micromètre permet donc d'apprécier, à la loupe, les centièmes de millimètre. L'échelle est fixée sur une règle type en platine ou en autre métal dont la dilatation est connue : la seconde règle peut être formée de métaux divers et même de cristal ou de verre; dans ce dernier cas, on doit avoir soin d'entourer l'extrémité des lames d'une petite feuille mince d'argent qui permette de serrer les vis à refus sans danger de rupture.

Le vernier est fixé sur la règle qu'on veut comparer à la première.

L'appareil repose sur quatre rouleaux de cuivre : tout le système est placé dans une auge de $0^m,150$ de profondeur et de $0^m,100$ de largeur. Deux plaques métalliques occupant la

largeur de la caisse permettent d'uniformiser la température en mélangeant les couches du liquide contenu dans l'auge; celle-ci est munie d'un couvercle portant quatre douilles que traversent autant de thermomètres destinés à indiquer les températures qui pourraient s'établir aux différents points des règles.

Si l'on se proposait de déduire λ' de la connaissance de λ, il faudrait mesurer la longueur l_0 de la règle type entre l'extrémité c et le zéro de l'échelle; cette opération fort délicate pourrait se faire sur la machine à diviser, alors que la règle abandonnée à elle-même dans une pièce à température constante aurait pris une température θ facile à observer; on diviserait la longueur relevée par $(1+\lambda\theta)$.

Mais on peut se borner à chercher, par la règle de Borda, si les dilatabilités des métaux sont proportionnelles entre elles et comparables à celles du mercure; les différences δ seraient dès lors en raison directe des températures t marquées par le thermomètre à mercure.

Manuel opératoire.

1° Pour point de départ, observons l'état des règles dans la glace finement concassée et continuellement agitée. Le zéro du vernier s'arrête à une division de l'échelle qui peut être déterminée au centième de millimètre; le nombre relevé correspond à la longueur à zéro mesurée précédemment.

2° L'auge étant remplie d'huile et disposée sur un fourneau, on l'échauffe graduellement jusque vers 100° : grâce à la masse du liquide, il est facile de maintenir une température déterminée pendant un temps suffisant pour que les règles se mettent en équilibre de température avec l'huile.

On procède alors à une seconde lecture qui fait connaître la différence de longueur δ correspondant à une variation de t degrés.

3° On répète ces observations à des températures de 200° et 300°.

Remarquons que le même vernier, fixé tour à tour sur les règles mises en expérience, permet d'effectuer ces détermina-

tions dans des conditions identiques et sans entraîner de nouveaux frais. C'est un avantage du vernier amovible.

Résultats.

Coefficients de dilatation linéaire.

	De 0 à 100.	De 0 à 200.	De 0 à 300.
Platine....	0,0000088	»	0,0000091
Cuivre.....	172	»	188
Fer.......	118	»	147
Verre.....	086	0,0000092	101
Argent....	191	»	»
Plomb.....	287	»	»
Zinc.......	341	»	»
Laiton....	190	»	»

Les métaux suivent dans leur dilatation une marche plus rapide que celle du thermomètre à mercure.

En faisant de la règle de Borda un thermomètre, Dulong et Petit trouvèrent que 200° du thermomètre à mercure correspondent environ à 310° du thermomètre métallique.

XVIIe MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA DILATATION DES ENVELOPPES DE VERRE PAR LE THERMOMÈTRE A POIDS.

Théorie.

Soit une enveloppe de verre contenant à zéro un poids de liquide P : vient-on à élever sa température à t degrés, il s'en déverse un poids p.

En exprimant que la capacité du contenant est égale au volume du liquide qu'elle renferme, nous trouvons la relation

$$P(1+Kt)=(P-p)(1+\delta t),$$

dans laquelle K est le coefficient de dilatation de l'enveloppe et δ celui du liquide.

De cette équation on peut tirer K, si δ est connu, ou bien δ, si un essai préalable a donné K; enfin, lorsque K et δ sont déterminés, cet instrument permet de mesurer la température t, ainsi que l'indique son nom de thermomètre à poids ou à déversement.

Pour étudier la dilatation des enveloppes de verre, nous remplirons le thermomètre de mercure; Regnault en a déterminé les coefficients moyens de dilatation δ.

	δ
Entre 0 et 50°	0,0001803
» 0 et 100	1815
» 0 et 150	1828

Description.

L'enveloppe, de forme cylindrique, de $0^m,015$ de diamètre

Fig. 24.

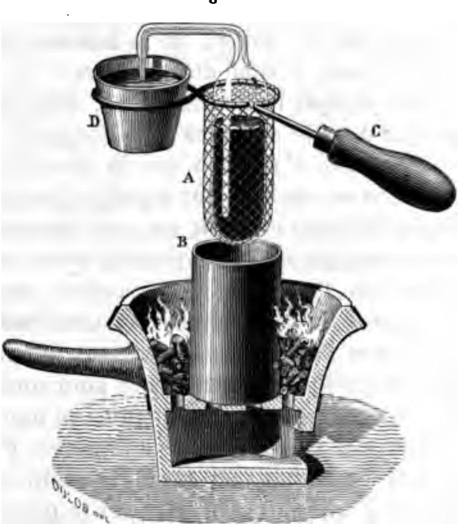


sur $0^m,1$ de hauteur, se termine à sa partie supérieure par

un tube capillaire recourbé deux fois à angle droit; ce tube doit être assez court pour qu'on n'ait pas à tenir compte de la faible différence de température qu'il peut présenter par rapport au réservoir. L'instrument contient de 350^gr à 400^gr de mercure.

Un appareil spécial (*fig.* 24) permet de maintenir toujours réunis le thermomètre et la coupelle de déversement; ils sont engagés tous les deux dans un support circulaire qui forme le couvercle d'un vase cylindrique faisant tour à tour l'office

Fig. 25.



de réfrigérant et de bain-marie. Ce même support peut être placé sur le plateau de la grande balance Deleuil.

Une corbeille à treillis A (*fig.* 25) reçoit le tube et le godet pendant l'opération du remplissage : cette sorte de grille peut être enfoncée dans un cylindre de fer B chauffé au rouge sur un fourneau, de manière qu'en cas d'accident il ne se perde pas de mercure.

L'air ayant d'abord été dilaté par la chaleur, on soulève l'instrument pour que le refroidissement fasse pénétrer dans le tube une certaine quantité de mercure; puis on le redescend et l'on chauffe jusqu'à l'ébullition.

Dulong et Petit recommandent de reproduire deux ou trois fois de suite l'ébullition, afin de purger entièrement le thermomètre d'air et d'humidité.

Il est prudent de chauffer le mercure de la coupelle, sinon l'afflux du liquide froid briserait le verre.

Manuel opératoire.

1° Le thermomètre est lavé, essuyé et desséché; la coupelle est nettoyée et séchée, ainsi que la plaque de support. Le tout est porté sur le plateau de la balance : on y adjoint 500gr et l'on fait la tare, le tube étant ouvert.

2° Après avoir rempli le thermomètre, dont la pointe ne cesse de plonger dans le mercure de la coupelle, on le porte dans la glace fondante. A mesure que le thermomètre se refroidit, le mercure se contracte et aspire le liquide du godet; au bout de vingt minutes environ, on peut admettre que l'enveloppe de verre est pleine de mercure à zéro. A ce moment on vide le godet, on l'essuie et on le replace sous la pointe effilée du tube; puis on porte tout le système sur le plateau de la balance, après l'avoir très soigneusement lavé et desséché. On attend quelque temps encore pour que le thermomètre reprenne la température ambiante; le mercure qui se déverse dans le godet n'échappe pas à la pesée. Pour retrouver l'équilibre, il faut remplacer les 500gr additionnels par un poids moindre, qui diffère du premier par le poids P du mercure introduit dans l'enveloppe.

3° Le thermomètre est reporté dans le bain-marie et chauffé à 100°, par exemple. Il s'écoule du mercure dans le godet : on l'en retire, puis on procède à une nouvelle pesée. Pour rétablir l'équilibre, il faut ajouter un poids p : c'est le poids de liquide déversé.

Remarquons que P et p ont été déterminés avec la même sensibilité absolue, mais non pas avec la même sensibilité relative; c'est pourquoi quelques physiciens modifient la marche de l'expérience en pesant directement le mercure déversé sur un trébuchet sensible au milligramme.

Résultats.

En répétant ces déterminations pour diverses valeurs de t, on peut faire une étude complète de la dilatation de l'enveloppe. En général, le coefficient s'élève avec la température ; mais sa valeur moyenne varie considérablement avec les divers échantillons et suivant leur forme et le travail qu'ils ont éprouvé.

Dilatation du verre
(d'après Regnault).

0 à 50°		0,0000269
0 à 100		276
0 à 150		283
0 à 200		291
0 à 100	verre blanc en tube	265
	» en boule de $0^m,046$ de diamètre.	259
	» en boule de $0^m,037$ de diamètre.	251
Valeur minimum		213
» maximum		276

XVIIIe MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA DILATATION DES LIQUIDES PAR LES THERMOMÈTRES COMPARÉS.

Théorie.

Cette méthode consiste à construire avec les liquides des thermomètres à tige, semblables aux thermomètres ordinaires, et à en comparer la marche avec celle d'un étalon contrôlé avec le plus grand soin par un thermomètre à air.

Imaginée par Gay-Lussac, elle a été appliquée avec succès

par Isidore Pierre (1); elle nécessite l'emploi d'un instrument dont la tige graduée en parties d'égale capacité marque les volumes correspondant aux divisions successives.

Un volume V_0 de liquide à zéro occupe dans le thermomètre à une température t un volume apparent V; en exprimant que le volume du contenu est égal à la capacité du contenant, on est conduit à la relation

$$V_0(1+xt) = V(1+Kt),$$

dans laquelle x est le coefficient de dilatation absolue du liquide et K celui du verre de l'enveloppe.

Description.

Le thermomètre à volume, que les Allemands appellent le *dilatomètre,* est gradué et étudié au moyen de mercure sec et pur dont on le remplit d'abord.

Le tube porte une échelle arbitraire dont nous admettrons que les divisions possèdent rigoureusement la même capacité: il s'agit de déterminer les nombres qui expriment la capacité du réservoir jusqu'à l'origine de la graduation et celle d'une division en fonction des mêmes unités. Cette opération se fait en introduisant dans le thermomètre une quantité de mercure telle que le niveau du liquide s'arrête au zéro lorsque l'instrument est plongé dans la glace fondante : le poids du mercure introduit, diminué du poids de l'enveloppe, donne la capacité du réservoir jusqu'au zéro de l'échelle. On ajoute alors une certaine quantité de mercure, de manière que, l'appareil étant entouré complètement de glace, le mercure atteigne une division n, voisine du sommet de la tige. La capacité d'une division se déduit sans peine de l'augmentation de poids. On prend pour densité du mercure à zéro la valeur 13,596 et l'on se dispense des corrections de pesée relatives à la poussée : avec une balance sensible au milligramme, on peut apprécier un volume égal à $\frac{1}{700}$ de millimètre cube. La seule difficulté

(1) *Annales de Chimie et de Physique,* 3e série, t. XV, XIX et XX.

le l'opération réside dans le remplissage à point voulu du hermomètre; on y arrive par tâtonnements.

Le coefficient de dilatation de l'enveloppe de verre se mesure par le procédé qui a été indiqué dans la dix-septième manipulation.

Le thermomètre peut dès lors être vidé, car il est prêt pour la détermination des coefficients de dilatation absolue des liquides. Il suffit d'un bain qu'on puisse chauffer graduellement de 0° à 100°, tout en agitant le liquide : le thermomètre-étalon et le thermomètre à liquide seront fixés l'un à côté de l'autre dans une douille placée au centre du couvercle de ce vase, et ils seront immergés jusqu'au niveau du liquide dans le tube, de manière à dispenser des corrections relatives à la tige.

Il convient que l'étalon ait la même longueur que le thermomètre à volume, afin que les deux réservoirs occupent les mêmes régions de la masse liquide destinée à les échauffer.

L'observation se fait à l'aide d'un viseur dont le champ embrasse les deux colonnes.

Manuel opératoire.

1° Le thermomètre à volume est rempli du liquide à étudier qu'on aura préalablement purgé d'air par une ébullition prolongée; pour certains liquides facilement décomposables par la chaleur, cette ébullition doit se faire dans l'air raréfié.

2° A zéro le liquide occupe un volume V_0.

3° Le bain chauffé graduellement est maintenu à une température sensiblement constante pendant dix minutes; l'opérateur saisit l'instant d'un maximum ou d'un minimum de hauteur de la colonne thermométrique des deux instruments : ces maxima diffèrent à peine l'un de l'autre, quand on agite vivement le liquide.

Cette observation donne à la fois V et t.

4° On répète la même expérience à différentes températures.

5° Quand on veut opérer au-dessous de zéro, on remplit le vase d'un mélange de glace pilée et de chlorure de calcium

cristallisé; par des additions convenables de l'une ou l'autre de ces deux substances, on parvient à maintenir constantes pendant plus d'un quart d'heure des températures de — 36°, lorsque l'air ambiant ne dépasse pas 2° ou 3°.

Résultats.

Ces expériences peuvent être facilement répétées sur l'alcool anhydre qu'on a débarrassé de son eau par digestion prolongée avec de la chaux et qu'on a finalement rectifié en le distillant sur un mélange de parties égales de potasse et de carbonate de potasse. La marche de la dilatation de ce liquide est très bien représentée par la formule

$$1 + \Delta t = 1 + 0,0010486 30\, t + 0,0000017 51\, t^2 + 0,0000000 01\, t^3.$$

Ce liquide n'a pas de maximum de densité : les deux racines de la dérivée sont imaginaires.

Les coefficients vrais de dilatation sont les suivants :

A zéro....................................	0,001 049
Au point d'ébullition, à 78°,3...............	0,001 196

La concordance des indications des thermomètres à alcool et à mercure est la suivante :

Thermomètres					
A mercure...	— 32,22	— 4,54	+ 28,00	+ 50,33	+ 76,73
A alcool......	— 26,82	— 3,98	+ 25,73	+ 47,52	+ 76,73

XIXe MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA DILATATION DES SOLIDES PAR LE THERMOMÈTRE A POIDS.

Théorie et description des instruments.

« Dans un tube de verre de $0^m,018$ de diamètre et de $0^m,6$ de longueur, nous avons introduit, disent Dulong et Petit [1], une baguette cylindrique de fer doux qui se trouvait maintenue dans l'axe du tube par quatre petites traverses d'une longueur presque égale à son diamètre. Après avoir soudé à l'extrémité de ce tube un autre tube capillaire, nous l'avons rempli entièrement de mercure que l'on a fait bouillir pendant un temps suffisant pour chasser complètement l'air et l'humidité. En l'exposant ensuite à diverses températures, et déterminant les poids de mercure qui en sortent, il est aisé d'en déduire la dilatation du fer. Pour faire le calcul, il est nécessaire de connaître les volumes de ces trois corps à la température de la glace fondante. Or celui du fer s'obtient en divisant son poids par celui de sa densité à zéro. On déduit de la même manière le volume du verre du poids du mercure qui le remplit à la même température. Enfin celui du mercure est évidemment la différence des deux premiers. »

Désignant par P et D_0 le poids et la densité du mercure à zéro, par P' et D'_0 le poids et la densité du fer et enfin par p le poids du mercure déversé, et égalant la capacité du contenant au volume du contenu, on peut écrire la formule

$$\left(\frac{P}{D_0}+\frac{P'}{D'_0}\right)(1+Kt)=\frac{P-p}{D_0}(1+\delta t)+\frac{P'}{D'_0}(1+xt),$$

dans laquelle x est le coefficient de dilatation cherché. Le

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. VII, p. 139; 1817.

coefficient de dilatation de l'enveloppe K a été déterminé dans une des manipulations précédentes.

Manuel opératoire.

On exécute la même série d'opérations que ci-dessus (p. 72).

Résultats.

Dulong et Petit ont opéré sur du fer, du platine et du cuivre : pour empêcher l'action dissolvante du mercure sur ce dernier métal, ils avaient pris la précaution d'en oxyder la surface.

Températures du thermomètre à air.	Dilatation moyenne.		
	Fer.	Platine.	Cuivre.
100°	$\frac{1}{28200}$	$\frac{1}{37700}$	$\frac{1}{19400}$
300°	$\frac{1}{22700}$	$\frac{1}{36300}$	$\frac{1}{17700}$

XXe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DE LA TEMPÉRATURE DU MAXIMUM DE DENSITÉ DE L'EAU.

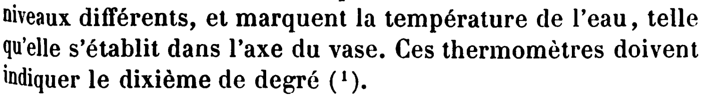
Théorie.

Pour constater l'existence du maximum de densité de l'eau, on répète dans les cours une ancienne expérience imaginée par le physicien écossais Hope; cette démonstration grossière est devenue entre les mains de Despretz un moyen précis de détermination de la température à laquelle correspond ce point singulier dans la dilatation de l'eau.

Cette méthode consiste à observer les variations de température d'un vase rempli de ce liquide, abandonné à lui-même dans un repos absolu, au milieu d'une enceinte dont la température est égale à zéro. Le refroidissement s'opérant par toute la surface du vase, il se produit d'abord un mouvement des couches les plus froides vers le fond; ce mouvement, qu'on suit à l'aide de thermomètres étagés sur toute la hauteur du vase, s'arrête aussitôt que la température correspondante au maximum s'est établie dans toute la masse; on observe dès ce moment une distribution inverse des températures, le thermomètre le plus froid étant à la partie supérieure de l'eau.

Il s'agit de déterminer la température à laquelle se produit ce changement d'allure dans l'expérience. Or on peut saisir ce point avec une grande précision, attendu qu'il est décelé par l'uniformité de température de toute la masse. En représentant la marche des thermomètres par des courbes dont les abscisses sont les temps et les ordonnées les températures, on constatera que les courbes se coupent en un même point dont l'ordonnée représentera la température du maximum.

Fig. 26.



Description.

On emploie une éprouvette fermée (*fig.* 26) d'environ $0^m,200$ de hauteur, qui peut être suspendue par des cordons; quatre thermomètres traversent la paroi à des niveaux différents, et marquent la température de l'eau, telle qu'elle s'établit dans l'axe du vase. Ces thermomètres doivent indiquer le dixième de degré [1].

[1] L'éprouvette peut être construite au laboratoire même : le perçage du verre s'effectue sans peine à l'aide d'un foret d'acier trempé au mercure. En humectant constamment le point attaqué avec une solution saturée de camphre dans l'essence de térébenthine, l'outil avance rapidement, comme dans du bois (*Revue industrielle*, 1er février 1882).

Manuel opératoire.

1° Le vase ayant été rempli d'eau distillée à 8° environ, on l'agite vivement et l'on s'assure d'abord que les quatre thermomètres sont rigoureusement d'accord; puis, l'éprouvette étant suspendue dans une salle dont la température est à zéro, on note le temps initial.

2° De cinq en cinq minutes l'opérateur relève les températures; il se gardera de toucher ou de remuer le vase, de crainte d'introduire une perturbation dans le phénomène.

3° Au voisinage de 4° l'observation doit être continue.

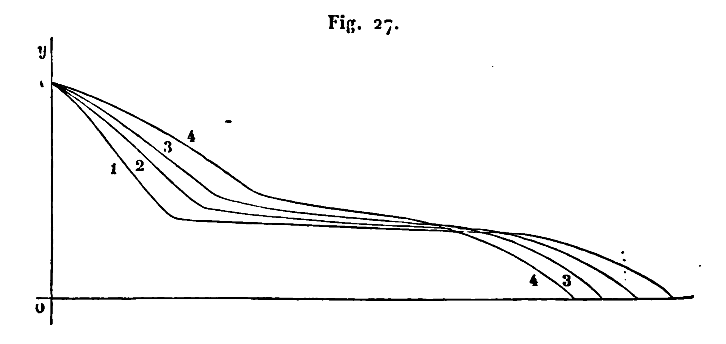
4° Le thermomètre supérieur marquant zéro, on chauffe la salle et l'on observe comme précédemment la marche inverse des thermomètres.

5° On trace les quatre courbes à l'échelle de $0^m,01$ par degré sur un papier quadrillé au dixième; les points relevés s'écartent très peu d'une ligne droite entre 5° et 3°,8, et il est facile d'en dessiner la trace moyenne.

Résultats.

Les courbes (*fig.* 27) devraient se couper au même point; il n'en est pas ainsi en réalité, mais les intersections sont

Fig. 27.



resserrées dans une région peu étendue, comme on le voit sur la figure. On prendra la moyenne des ordonnées des points d'intersection deux à deux : bien que les courbes se rencon-

·ent sous des angles très aigus, la détermination de l'ordonnée moyenne présente une grande précision, par suite de horizontalité des branches de courbe au voisinage de 4°.

Despretz trouva 3°,98 pour la température du maximum de lensité : or le chiffre le plus probable aujourd'hui est 3°,94.

Voici, d'après M. Volkmann, les volumes et les densités de l'eau distillée, tels qu'on les calcule en faisant la moyenne des meilleures observations. Ce tableau présente une grande utilité pratique.

Volumes et densités de l'eau.

T.	VOLUMES.	DENSITÉS.	T.	VOLUMES.	DENSITÉS.
0....	1,000122	0,999878	13....	1,000570	0,999430
1....	067	933	14....	703	297
2....	028	972	15....	847	154
3....	007	993	16....	997	004
4....	1,000000	1,000000	17....	1,001162	0,998839
5....	008	0,999992	18....	339	663
6....	031	969	19....	527	475
7....	067	933	20....	731	272
8....	118	882	21....	939	065
9....	181	819	22....	1,002156	0,997849
10....	261	739	23....	383	623
11....	350	650	24....	621	386
12....	456	544	25....	868	140

XXIe MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA DILATATION DE L'AIR SOUS VOLUME CONSTANT.

Théorie.

Nous nous proposons de reproduire l'expérience célèbre de Regnault sur la dilatation de l'air (¹).

(¹) *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, t. XXI ; 1847.

L'équation bien connue du problème est la suivante :

$$\left(V_0\frac{1+KT}{1+\alpha T}+\frac{v}{1+\alpha t}\right)H=\left(V_0+\frac{v}{1+\alpha t}\right)(H'-h'),$$

dans laquelle V_0 est le volume du récipient à zéro, v celui du raccord capillaire, T la température à laquelle le gaz a été porté, H et H' les pressions de l'atmosphère dans la première et la deuxième phase de l'expérience, h' la différence observée au manomètre quand le gaz est refroidi à zéro, et t la température de l'air ambiant supposée constante.

Pour calculer α, Regnault emploie la méthode des approximations successives, c'est-à-dire qu'il tire d'abord de l'équation précédente

$$1+\alpha T=\frac{\left[V_0(1+KT)+v\dfrac{1+\alpha T}{1+\alpha t}\right]\dfrac{H}{H'-h'}}{V_0+\dfrac{v}{1+\alpha t}};$$

puis, une valeur approchée de α étant introduite dans le second membre, il en déduit une certaine valeur de α dans le premier, laquelle, étant substituée ensuite dans le second membre, donne la valeur définitive de $1+\alpha T$.

Regnault faisait toujours deux expériences consécutives, la première de T à zéro, la seconde de zéro à T; les pressions observées dans cette dernière opération étant H'' et H'' + h'', on avait une nouvelle équation

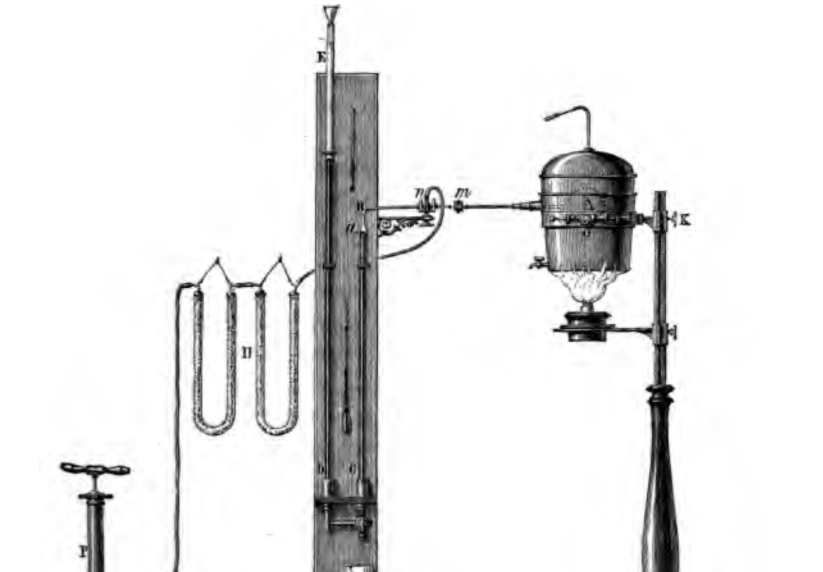
$$1+\alpha T=\frac{\left[V_0(1+KT)+v\dfrac{1+\alpha T}{1+\alpha t'}\right]\dfrac{H''+h''}{H''}}{V_0+\dfrac{v}{1+\alpha t'}}.$$

Description.

M. Golaz a reproduit, pour les laboratoires d'enseignement, le modèle que possède l'École Polytechnique (*fig.* 28). Il me semble inutile de donner la description détaillée de cet instrument dont les dispositions, analogues à celles du voluménomètre, sont suffisamment connues du lecteur.

Le volume V_0 est jaugé à l'eau distillée; le volume v du raccord capillaire et de la partie supérieure du manomètre est au contraire déterminé par un jaugeage au mercure. Dans l'appareil de Regnault, V_0 mesurait $727^{cc},7$ et v 2^{cc} environ.

Fig. 28.



On ne peut déterminer directement le coefficient de dilatation du ballon; il faudrait pour cela y faire bouillir une masse de 9^{kg} à 10^{kg} de mercure, et c'est là une opération impraticable. Regnault prit la moyenne de plusieurs nombres obtenus avec divers vases plus petits fabriqués avec le même verre; K était égal à 0,0000233.

La dessiccation du ballon se fait pendant que l'eau de la

chaudière est en pleine ébullition; après avoir fermé la branche BC du manomètre, pour immobiliser la colonne de mercure, on adapte, au moyen d'un tube de caoutchouc, le tuyau *n* à une petite pompe à main P, qui permet de faire le vide jusqu'à $0^m,005$ ou $0^m,006$; puis on ferme le robinet à trois voies, et l'on met l'appareil en communication avec une série de tubes desséchants remplis de ponce sulfurique concassée grossièrement, en fragments du volume d'un pois : lorsque les fragments sont plus fins, ils opposent trop de résistance au passage de l'air. La pierre ponce neuve doit être d'abord imprégnée d'acide sulfurique faible, puis calcinée au rouge dans un creuset de terre. Cette opération préliminaire a pour but de décomposer quelques parties calcaires et des matières organiques qui peuvent se trouver dans la ponce. La pierre refroidie est imbibée ensuite d'acide sulfurique concentré, égouttée, puis introduite dans les tubes en U. Ces tubes sont fermés par des bouchons traversés par des ajutages recourbés en verre et recouverts d'un mastic à la résine. Pour ne pas les mettre trop vite hors d'usage, j'ai adjoint à l'appareil tubulaire un flacon de verre rempli d'acide sulfurique concentré, à travers lequel le gaz doit barboter avant de pénétrer dans les tubes.

Regnault faisait le vide 25 à 30 fois, et il ne laissait rentrer l'air que très lentement : les robinets restaient ouverts pendant une demi-heure après la dernière opération et on ne les fermait pas avant d'avoir séparé les tubes desséchants, de façon que la pression intérieure fût rigoureusement égale à celle de l'atmosphère.

L'observation des pressions se fait au cathétomètre. Regnault signale dans son Mémoire une précaution à prendre :

« Il faut être bien en garde, dit-il, quand on vise le contour supérieur du ménisque, d'être induit en erreur par des effets de réflexion à la surface courbe du mercure. Le procédé qui m'a paru le plus sûr consiste à placer une bougie dans la direction du rayon qui vise au ménisque, et par derrière, de manière que le contour du ménisque se dessine en noir sur la flamme de la bougie. »

La température T est celle de l'ébullition de l'eau sous la pression observée au moment de l'expérience.

Manuel opératoire.

1° Le manomètre et le ballon ayant été desséchés par une opération préalable à 100°, l'opérateur amène le niveau du mercure au trait de repère a, et note la pression barométrique H, au moment de la fermeture du robinet n.

2° Il cesse alors de chauffer la chaudière, et fait écouler l'eau chaude par un robinet disposé à cet effet; pour hâter le refroidissement du ballon, on peut verser de l'eau froide dans le vase; enfin le ballon est entouré de glace concassée en menus fragments. L'air se contractant par le refroidissement, le mercure tend à dépasser le niveau du repère a; on l'y maintient en faisant écouler du mercure par le robinet inférieur.

3° Les niveaux restent enfin stationnaires; après quelques minutes d'attente, l'observateur note la hauteur H' du baromètre, et il mesure au cathétomètre la hauteur h' du mercure dans la petite branche au-dessus du niveau dans la grande. La première expérience est dès lors finie : il s'agit de procéder à la seconde.

4° Le tuyau n est remis en communication par un raccord de caoutchouc avec l'appareil de dessiccation; puis on ouvre doucement le robinet pour rétablir dans le ballon la pression atmosphérique, tout en maintenant le niveau du mercure en a; il sera nécessaire de verser du mercure par la grande branche pour obtenir ce résultat. On note la pression H'' et l'on ferme le robinet.

5° La glace est alors remplacée par de l'eau qu'on porte à l'ébullition. Le mercure tend à baisser dans la petite branche du manomètre; on maintient le niveau en a en versant du mercure par E, et au bout d'une heure environ, on note H''' et l'on mesure h'''.

Résultats.

Regnault donne les chiffres suivants, obtenus par ce procédé :

Première opération.

H.	T.	t.	H'.	h'.	(1 + 100α).
747mm,97	99°,55	13°,0	748mm,52	198mm,76	1,36662

Deuxième opération.

H''.	T.	t.	H'''.	h'''.	(1 + 100α).
748mm,72	99°,59	12°,9	749mm,19	269mm,59	1,36580

La moyenne d'un grand nombre de déterminations a ét 1,3665.

XXIIe MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA DILATATION DE L'AIR SOUS PRESSION CONSTANTE.

Théorie.

Conservons les notations adoptées dans la manipulati précédente, et appelons u le volume dont le gaz se dila quand sa température s'élève de 0° à T : u est mesuré à u température constante θ.

Nous aurons

$$\left(V_0 + \frac{v}{1+\alpha t}\right) H = \left[\frac{V_0(1+KT)}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{u}{1+\alpha\theta}\right] H',$$

d'où

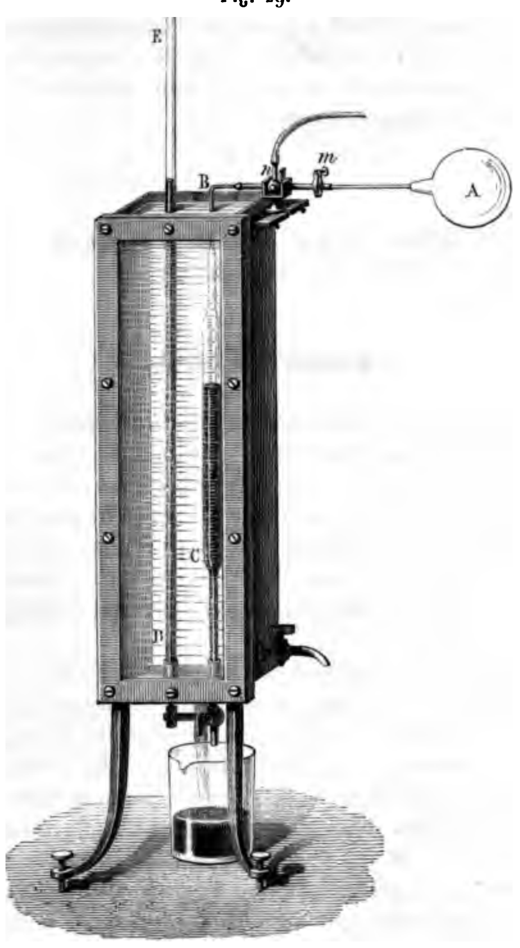
$$1+\alpha T = \frac{H'(1+KT)}{H + \frac{v}{V_0}\frac{H}{1+\alpha t} - \frac{v}{V_0}\frac{H'}{1+\alpha t} - \frac{u}{V_0}\frac{H'}{1+\alpha\theta}}.$$

L'expérience peut être répétée deux fois comme ci-dessus

Description.

a capacité u étant une fraction notable du volume V_0, il absolument nécessaire d'entourer le tube d'un bain liquide

Fig. 29.



pour connaître avec précision sa température θ. Le manchon représenté par la *fig.* 29 remplit cet effet.

Il faut dans cette opération apporter le plus grand soin à la détermination du volume u : on y procède en faisant couler une quantité de mercure suffisante pour que le ménisque passe exactement de sa position initiale à sa position finale. On peut ajuster les ménisques à $\frac{1}{50}$ de millimètre près. Le poids du mercure sorti donne le volume cherché, mais il y a une correction à faire à cause de la température; si p représente le poids de mercure recueilli à la température θ du manchon au moment du jaugeage, le poids du mercure à zéro qui remplirait l'espace u serait

$$p\left(1+\frac{\theta}{5550}\right).$$

Les appréciations des hauteurs du mercure et les mises de niveau se font à l'aide du cathétomètre.

Manuel opératoire.

1° Il est bon de commencer l'opération à zéro : le mercure est amené de niveau dans les deux tubes, à la hauteur du repère supérieur, et l'opérateur note la pression barométrique H, la température t de l'air intérieur et celle θ du manchon. L'eau doit avoir été agitée au moins un quart d'heure à l'avance, au moyen d'un agitateur auquel on donne un mouvement de va-et-vient vertical, de manière à lui faire parcourir toutes les couches de liquide.

2° La glace ayant été retirée, on porte l'eau de la chaudière à l'ébullition. Pour maintenir les deux colonnes de mercure à peu près au même niveau, on est obligé de faire couler du mercure en ouvrant le robinet inférieur. Une portion de l'air du ballon passe ainsi dans le tube du manomètre; sur la fin de l'opération, les deux colonnes étant rigoureusement de niveau, on note de nouveau la pression barométrique et la température du manchon, et l'on fixe la position de la colonne mercurielle par une visée au cathétomètre;

3° On détermine le volume u ainsi qu'il a été dit ci-dessus. Quelquefois le tube manométrique est gradué en parties d'égale capacité, et la valeur de u se lit directement; c'est

très simple, mais il faut reconnaître que l'appréciation du volume se fait tout au plus à 1^{cc} près.

Résultats.

Voici les chiffres d'une expérience de Regnault :

H.	t.	H'.	T.	u.	$(1+100\alpha)$.
$757^{mm},72$	$17^{\circ},64$	$754,70$	$99^{\circ},81$	$124^{cc},31$	$1,36718$

La valeur moyenne admise est 1,36706.

XXIIIe MANIPULATION.

EMPLOI DU THERMOMÈTRE A AIR.

Théorie.

La forme primitive du thermomètre à air a été conservée, mais la manipulation en a été singulièrement perfectionnée par Regnault.

L'équation qui lie la température T aux données de l'expérience exécutée suivant sa méthode est

$$P\,\frac{1+KT}{1+\alpha T}\,H = (P-p)(H'-h),$$

dans laquelle P est le poids du mercure qui remplit le thermomètre à zéro, p le poids du mercure qui y pénètre quand la température passe de T à zéro, H et $H'-h$ les pressions de l'air dans l'instrument au début et à la fin de l'expérience.

On tire la valeur de T de cette équation.

Description.

Le thermomètre se compose d'un réservoir cylindrique de verre A (*fig.* 30), terminé par un tube recourbé dont l'extrémité est effilée. Le réservoir, de 25^{mm} à 30^{mm} de diamètre sur 110^{mm} environ de longueur, peut contenir 800^{gr} à 1000^{gr} de mercure.

Au sortir du milieu dont on veut évaluer la température, le

Fig. 30.



thermomètre est placé sur un support particulier destiné à faciliter la mesure de la pression. Maintenu par une tige à vis et par trois colonnettes mobiles, l'instrument plonge par sa partie inférieure dans une cuve à mercure : une cuiller de fer remplie de cire molle, qui peut glisser le long d'une règle horizontale, permet de fermer la pointe effilée sous le mercure. Enfin l'enveloppe cylindrique E est disposée pour retenir la glace dont le réservoir est entouré.

Les observations des hauteurs mercurielles se font au cathétomètre et à l'aide de la vis H.

Manuel opératoire.

1° Une opération préalable ayant fait connaître P et K, et le thermomètre étant rempli d'air sec et pur, on le porte dans l'enceinte dont on cherche la température. Après avoir attendu que le thermomètre se soit mis en équilibre avec le milieu ambiant et avoir constaté qu'il communique avec l'atmosphère, sans qu'il puisse toutefois y rentrer de l'air humide, on en ferme la pointe au chalumeau et l'on inscrit la hauteur barométrique H.

2° On fait un trait de lime à 10^{mm} au moins de la pointe et l'on renverse le thermomètre sur le mercure, recouvert d'une couche mince d'acide sulfurique concentré; saisissant alors le bout du tube avec une pince, le plus loin possible du trait, on le brise; le mercure y pénètre aussitôt et s'élève à une certaine hauteur. On environne le réservoir de glace fondante et l'on abandonne l'instrument à lui-même pendant une heure environ, après avoir soigneusement nettoyé la surface du bain de mercure.

3° Le tube est fermé à l'aide de la cuiller; puis, ôtant la glace et le manchon, l'opérateur mesure la hauteur h du mercure soulevé et il note la pression H'.

4° Il ne reste plus qu'à enlever le thermomètre de son support et à déterminer le poids du mercure qui y a pénétré : c'est p.

Résultats.

Le seul écueil de cette méthode est l'entrée de l'air extérieur dans le tube au moment où l'on en casse la pointe sous le mercure.

Regnault montait sur le tube des petits disques de laiton décapé qui s'amalgamaient et supprimaient ces rentrées; l'acide sulfurique remplit le même objet sans que toutefois cette cause d'erreur soit entièrement évitée de la sorte.

Regnault donne les nombres suivants, résultant d'une expérience :

P.	p.	H.	H'.	h.	100 K.
853gr,417	108gr,417	764mm,62	764mm,50	122mm,31	0,00255

On en déduit la valeur de T :

$$T = 100^\circ,18.$$

CHAPITRE V.

CHANGEMENTS D'ÉTAT.

XXIVe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DES TEMPÉRATURES DE FUSION.

Théorie.

Il semble que rien ne soit plus simple et plus facile que de déterminer le point de fusion d'une substance, et cependant c'est une des opérations les plus délicates de la Physique : je n'en veux donner pour preuve que les résultats différents obtenus par les plus habiles expérimentateurs.

Parmi tous les procédés employés pour déterminer les points de fusion, celui de M. Himly me paraît le plus exact et le plus sûr ([1]). Il consiste à recouvrir de métal le réservoir d'un thermomètre très sensible et à disposer un circuit de telle sorte qu'au moment précis de la fusion le courant passe et mette en mouvement une sonnerie; prévenu par ce signal, l'opérateur note aussitôt la température du thermomètre.

Description.

Le thermomètre dont se sert M. Himly est à réservoir argenté. Le procédé par lequel il dépose sur le verre une couche mince de métal mérite d'être signalé ici.

([1]) *Annales de Poggendorff*, t. CLX, p. 102; 1877.

17 parties d'azotate d'argent et 28 parties de sel de Seignette

$$(KO, NaO, C^8H^4O^{10} + 8HO)$$

sont dissoutes séparément dans la quantité d'eau nécessaire puis on mélange les deux solutions. Le précipité qui se form est lavé avec soin à plusieurs reprises et conservé avec un léger excès d'eau dans un flacon bouché, à l'abri de la lumièr. On l'agite vivement au moment de s'en servir, et l'on y ajout lentement une solution ammoniacale très légère, de maniè à dissoudre de nouveau le précipité d'argent sans que toutefo l'alcali se trouve jamais en excès; il est donc prudent d'arrêt l'opération avant que tout le précipité ait disparu. Au bo de quelques minutes apparaît un dépôt miroitant sur les p rois du flacon : c'est alors qu'il convient de plonger dans liqueur le thermomètre à argenter, après l'avoir soigneuseme lavé avec de l'acide nitrique, de la potasse, un peu d'alcool enfin de l'eau distillée.

On remue le liquide avec le thermomètre pour obtenir u dépôt bien régulier.

Ce n'est qu'une mince pellicule d'argent qui se dépose la surface du verre : M. Himly la recouvre d'un dépôt galva nique et y rattache un fil de cuivre qui servira dans la suit de l'opération; la double couche métallique doit être trè mince ([1]).

([1]) L'argenture sur verre est une opération qui doit être familière au physicien. Je crois nécessaire de consigner ici, d'après le *Recueil des Travaux scientifiques de Léon Foucault*, les procédés auxquels ce savant donnait la préférence pour la préparation des miroirs; on pourrait y recourir pour métalliser les thermomètres.

1° *Nettoyage des surfaces.*

Cette opération préalable exerce une grande influence sur la manière dont le dépôt métallique s'opère sur le verre. On commence par mouiller la surfac de quelques gouttes d'acide nitrique pur, que l'on étend rapidement au moyen d'un tampon de coton, puis on lave cette surface à l'eau et on l'essuie avec un linge sec. On la saupoudre ensuite de blanc d'Espagne, en ajoutant assez d'ea distillée pour former une pâte qu'on répand sur toute la surface à l'aide d'u tampon de coton. La pièce est laissée à plat pendant le temps nécessaire à l'évaporation de l'eau; enfin on fait disparaître le blanc par un frottemen léger avec un nouveau tampon peu serré, fréquemment renouvelé. On fini

Le même thermomètre peut être employé pour les corps conducteurs ou non conducteurs de l'électricité, mais la disposition de l'expérience diffère suivant le cas.

Le corps non conducteur recouvre le thermomètre comme un vernis et l'isole du mercure A dans lequel il est plongé

---

en chassant les poussières qui se sont attachées sur le verre électrisé par le frottement.

2° *Composition du bain d'argent.*

Le bain définitif se compose de quatre solutions provisoires dont voici la composition :

A. Ammoniaque étendue. — On étend l'ammoniaque du commerce jusqu'à ce que la solution marque 3° à l'aréomètre Cartier.

B. Nitrate ammoniacal d'ammoniaque. — Dans 200^{gr} d'eau on dissout 100^{gr} de nitrate d'ammoniaque sec et l'on y ajoute 100^{cc} de la précédente solution d'ammoniaque.

C. Teinture de galbanum. — 20^{gr} de gomme de galbanum molle, blonde, douée d'une forte odeur vireuse, sont malaxés dans 80^{cc} d'alcool à 36° et chauffés à 50°. La solution claire doit marquer 29° Cartier.

D. Teinture de girofles. — C'est une solution composée de :

Essence de girofles..............	25^{cc}
Alcool à 36° Cartier.............	75^{cc}

De tous ces produits, on forme un mélange ainsi composé :

Solution A......................	24^{cc}
Solution B......................	7^{cc}
Solution C......................	110^{cc}
Alcool à 36°....................	450^{cc}
HO..............................	100^{cc}
AgO, AzO^5 fondu..............	50^{gr}

On fait d'abord dissoudre le nitrate d'argent dans l'eau et l'on ajoute la solution B, puis l'alcool, et enfin la liqueur C. La solution qui en résulte brunit promptement et forme un précipité au bout de quelques jours; on la décante et on la conserve dans l'obscurité sous le nom de *solution normale.*

Au moment de s'en servir, on y ajoute 3 pour 100 de la teinture D et de 1 à 5 pour 100 d'eau pour ralentir la réaction.

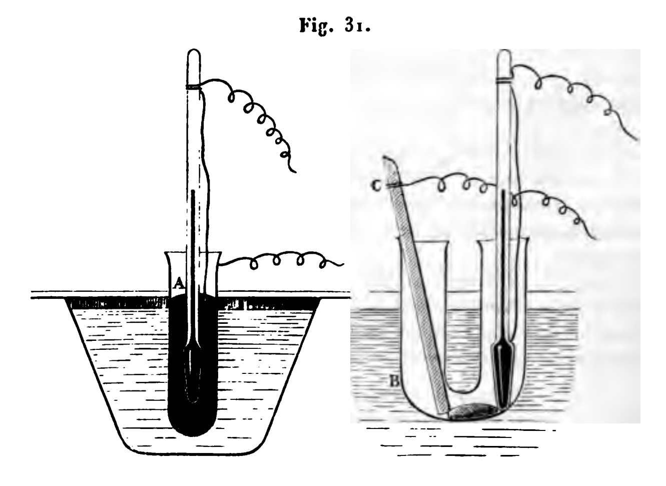
Le dépôt d'argent se forme rapidement. S'il présente des reflets violacés et semble recouvert d'un voile blanchâtre, il y a insuffisance d'ammoniaque; si, au contraire, l'alcali était en excès, la teinture de girofles déterminerait une prise en masse et le dépôt serait recouvert d'une couche pulvérulente d'un gris foncé : dans ce cas on ajouterait quelques gouttes d'acide nitrique.

L'opération dure vingt minutes environ; on porte le verre argenté dans l'alcool à 25° Cartier, on agite, on lave à l'eau et l'on polit au rouge d'Angleterre avec un tampon de peau.

(*fig.* 31); au moment où la fusion commence, le contact s'établit et la sonnerie appelle l'attention de l'observateur sur le thermomètre.

Pour les corps conducteurs, l'opération s'exécute dans un tube en U de porcelaine B, dans l'une des branches duquel se trouve le thermomètre et dans l'autre une baguette du métal à essayer C. Le thermomètre et la baguette appartiennent au circuit : il sera fermé par les premières gouttes du métal fondu qui s'amasseront au fond du tube.

Fig. 31.



Les tubes sont chauffés au bain-marie dans l'eau ou dans une solution saline, ou encore dans la glycérine saturée de chlorure de calcium; pour fondre les métaux on peut recourir à un alliage ou bien au mercure.

Le circuit comprend le fil du thermomètre, une pile de Leclanché, une sonnerie, et se termine au mercure du tube A ou bien à la baguette fusible.

Manuel opératoire.

1° Pour enduire le thermomètre du corps non conducteur, on en fait fondre une petite quantité dans un tube de verre et

ge le réservoir jusqu'au point où il sera immergé
rcure; on le retire au bout d'un instant : l'épaisseur
ne doit être d'au moins 1^{mm}.
in-marie est chauffé graduellement jusqu'au point
le la substance; aussitôt le signal entendu, on note
ture.
n opère sur un corps conducteur, on rapproche le
le peut l'extrémité de la baguette C du réservoir
thermomètre, sans toutefois les amener au con-
ne l'indique la *fig.* 31.

Résultats.

Points de fusion.

....	30°	Alliage de d'Arcet.........	94°
....	43,7	Arsenic....	210
....	44	Étain....................	235
....	51	Bismuth..................	265
....	61	Plomb....................	335
....	63	Antimoine................	440
		Zinc.....................	450
		Cadmium.................	500

XXVe MANIPULATION.

IINATION DES TEMPÉRATURES DE SOLIDIFICATION.

Théorie.

nez a utilisé les phénomènes de surfusion pour
er les températures de solidification de quelques li-
ec une précision qui n'est limitée, dit-il, que par la
le l'observateur (1).

al de *Physique*, V, p. 212; 1875.

Description et Manuel opératoire.

« On met dans un tube de verre de 30^{mm} de diamètre, fermé à un bout, une quantité du corps solide telle qu'à l'état liquide il forme une couche de 50^{mm} à 60^{mm} de hauteur; on dispose suivant l'axe de ce tube un thermomètre retenu par un bouchon et dont le réservoir, assez petit pour n'avoir sur la température du liquide ambiant qu'une influence négligeable, descend jusqu'à quelques millimètres du fond du tube sans le toucher; puis on détermine la fusion du corps en l'introduisant dans un bain d'eau ou de paraffine de quelques degrés supérieur au point de solidification présumé.

Lorsque le corps est entièrement fondu, on amène le tube dans un bain à température constante, inférieure à la température cherchée, et l'on attend que les indications de deux thermomètres, l'un intérieur, l'autre extérieur, ne diffèrent que très peu. On accélère ce résultat en faisant tourner le tube autour de son axe, ce qui ne provoque pas la solidification, à moins que dans ce mouvement le thermomètre ne frotte contre les parois du tube baignées par le liquide. Le corps étant ainsi à l'état de surfusion, on introduit, par un deuxième trou du bouchon, une fine aiguille de verre dont l'extrémité est recouverte d'une très petite quantité de la matière à l'état pulvérulent, et l'on amène cette extrémité dans le liquide dont elle détermine aussitôt la solidification.

Pour activer le phénomène, on fait tourner le bouchon autour de son axe, ce qui déplace la tige et promène cylindriquement les germes cristallins autour du thermomètre. On suit alors les indications de cet instrument, qui atteint bientôt un maximum, lequel n'est sûrement pas supérieur au point de solidification, mais peut lui être inférieur. On recommence donc l'expérience en prenant pour température du bain ambiant le maximum précédent et, en opérant de la même manière, on détermine la solidification du liquide : on trouve que le thermomètre indique un maximum supérieur au précédent. Après deux ou trois essais de ce genre, on arrive à des températures qui ne diffèrent les unes des autres que d'une fraction

de degré négligeable; on prend la température la plus élevée pour température de solidification de la substance, en lui faisant subir la correction provenant de ce que toute la tige du thermomètre n'est pas baignée par le liquide. »

Résultats.

Cette méthode s'applique très heureusement au soufre et elle a permis à M. Gernez d'éclaircir les particularités si diverses que présente ce métalloïde dans ses changements d'état.

Le soufre, insoluble dans le sulfure de carbone, se solidifie à 114°,3, quelle que soit la température à laquelle on l'ait fondu. Mais cette constance ne se retrouve pas dans le soufre octaédrique, qui se solidifie à 117°,4, après fusion à 144°, et à 112°,2 après fusion à 170°.

Quant au soufre prismatique, la température de la solidification dépend aussi de son état antérieur.

Le soufre mou, le soufre en fleur et le soufre en canons donnent des résultats intermédiaires variables avec les échantillons et en dépendance immédiate avec la teneur en soufre insoluble.

CHAPITRE VI.

GAZ ET VAPEURS.

XXVIᵉ MANIPULATION.

ÉTUDE DE L'ÉTAT CRITIQUE.

Théorie.

Les dernières expériences de MM. Pictet et Cailletet ont démontré qu'aucun gaz n'est incoërcible et véritablement permanent, car,, au-dessous d'une certaine température, appelée par M. Andrews le *point critique,* tous les gaz sont des vapeurs liquéfiables; par contre, au-dessus de cette température déterminée pour chacun d'eux, ils résistent aux pressions les plus considérables que nous puissions produire.

M. Natterer a dépassé sans succès 2800^{atm}.

La pression et la température pour lesquelles la liquéfaction cesse de se produire sont le plus souvent en dehors des limites d'une expérience de laboratoire; cependant, en comprimant les gaz acide carbonique et protoxyde d'azote dans l'appareil de M. Cailletet, on peut suivre facilement toutes les particularités du passage de l'état gazeux à l'état liquide, et déterminer ainsi exactement la position du point critique dans l'échelle des températures.

Avant que ce point soit atteint, le gaz comprimé à la température constante se liquéfie en diminuant subitement de volume, et l'on voit nettement un ménisque concave surmontant le mercure; après l'avoir dépassé, la surface de sépara-

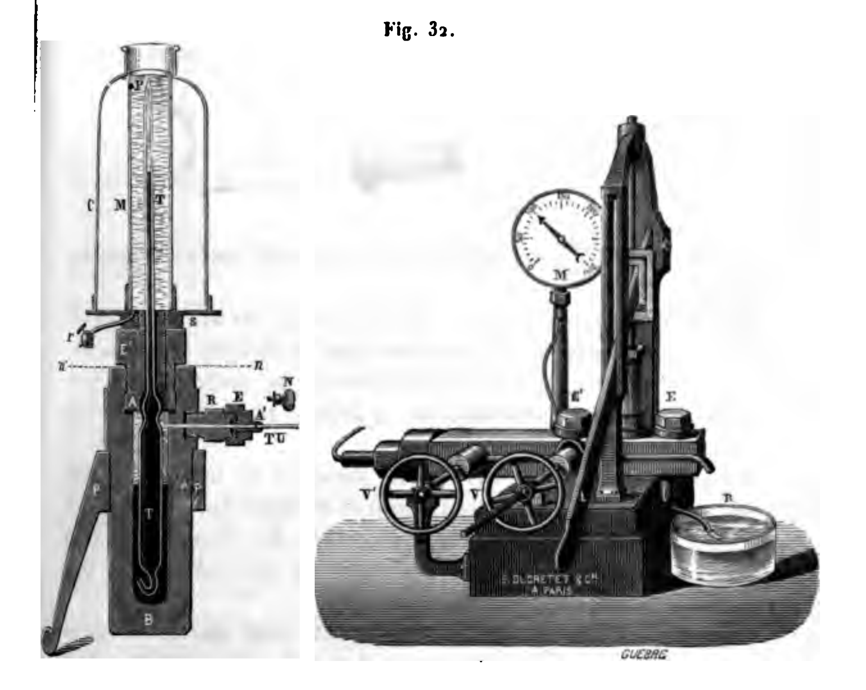
tion du liquide et du gaz devient indécise, elle perd sa courbure et disparaît entièrement; l'œil ne distingue plus que des stries qui ondoient à travers la masse, comme lorsqu'on mêle des gaz à différentes températures.

En resserrant entre des limites étroites la température à laquelle correspond ce changement d'allure dans le phénomène, on peut déterminer assez exactement le point critique : tel est le but de la présente manipulation.

Description.

L'appareil de M. Cailletet (*fig.* 32) est semblable à celui de M. Andrews. La pression est produite par une presse hydraulique à levier qui sert à comprimer de l'eau au-dessus du mercure contenu dans la cuve de fonte B : un piston plongeur

Fig. 32.



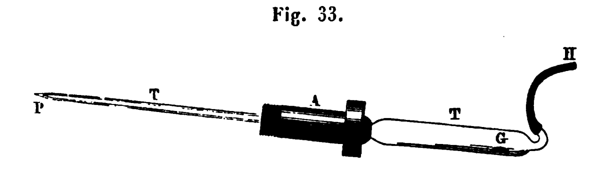
commandé par le volant V permet de faire croître lentement la pression, qui peut atteindre 300^{atm} ; on la mesure par un manomètre métallique.

Le gaz est renfermé dans une éprouvette T, à pointe effilée, qui plonge dans le mercure, tandis que la partie supérieure reste visible : c'est là que se produit la liquéfaction du gaz. Un manchon cylindrique de verre P entoure le tube; on peut y introduire un mélange réfrigérant liquide ou bien le faire traverser par un courant d'eau à température constante, de manière à faire varier la température de $-10°$ à $+40°$.

L'éprouvette de verre est mastiquée à la glu marine dans un ajutage métallique A qui forme le joint supérieur du réservoir à mercure; on l'assujettit par un écrou.

Pour opérer le remplissage du tube, on en brise la pointe P, puis on y introduit une goutte de mercure qui vient se pla-

Fig. 33.



cer en G (*fig.* 33) : un tube de caoutchouc H amène le gaz sec et pur.

On le fait passer jusqu'à ce que tout l'air ait été balayé, puis on referme la pointe en la fondant au dard du chalumeau. Le tube étant alors dressé verticalement, le mercure remplit la partie recourbée et empêche la déperdition du gaz ou son mélange avec l'air extérieur.

En portant l'éprouvette sur le mercure de la cuve, il faut avoir soin de l'y enfoncer lentement et de faire écouler d'abord la couche d'eau qui se trouve à la surface, de crainte qu'il n'en pénètre dans le tube; l'orifice A' aura été préalablement ouvert dans ce but.

Après avoir vérifié enfin que les joints sont munis de leurs rondelles de cuir gras, on serre les écrous, et l'appareil se trouve monté pour l'expérience.

Manuel opératoire.

1° Le tube étant amené à la température à laquelle on veut opérer, on donne d'abord quelques coups de piston, en agissant sur le levier L, de manière que le mercure devienne visible dans le tube, puis on réduit peu à peu le volume du gaz en tournant le volant V. Bientôt on voit le ménisque mercuriel se déformer légèrement et se recouvrir de liquide : on note à l'instant même la pression et la température.

2° On répète la même opération à diverses températures : partant de 0°, on peut échelonner les observations de 5° en 5°; la pression de liquéfaction croît rapidement.

3° A une certaine température, le gaz devient incoërcible : l'apparition caractéristique des stries, coïncidant avec les résultats négatifs de l'expérience aux plus hautes pressions, démontre que le point critique a été dépassé. On attend alors que, la température s'abaissant par le refroidissement, le liquide redevienne visible; la température à laquelle on verra poindre la première goutte est assez exactement celle du point critique.

Cette expérience réussit fort bien avec l'acide carbonique, le protoxyde d'azote, l'acétylène et même le bioxyde d'azote, dont le point critique est situé entre — 11° et 8° : le mélange réfrigérant le plus favorable est formé de 3 parties de chlorure de calcium fondu préalablement à 127° et de 2 parties de neige; d'après M. Pfaundler, ce mélange peut descendre à — 51°.

On pourrait étendre considérablement le champ de ces observations en adoptant un dispositif qui permît l'application du chlorure de méthyle au refroidissement du tube, car les mélanges réfrigérants ordinaires sont d'un emploi pénible par défaut de transparence, et ils ne permettent pas de graduer les températures comme il le faudrait.

En comprimant à 20^{atm} vers 14° un mélange à volumes égaux de gaz acide chlorhydrique et d'hydrogène phosphoré pur, on forme une combinaison qui apparaît à l'état liquide ou cristallin, suivant les conditions de température et de pres-

sion; cette expérience très élégante, due à M. Ogier, peut être répétée facilement à la suite de cette manipulation.

Résultats.

M. Andrews a donné le Tableau suivant, qui résume ses remarquables expériences sur l'acide carbonique :

Température.	Pression de liquéfaction.
°	atm
0	35,04
5,45	40,44
11,45	47,04
16,92	53,77
22,22	61,13
25,39	65,78
28,30	70,39
30,82	76

A ce moment, on voit apparaître les stries : la liquéfaction est dès lors impossible.

Le point critique de l'acide carbonique est donc à 30°,82, mais il suffit de l'addition de $\frac{1}{16}$ d'air pour l'abaisser de plusieurs degrés.

Voici, d'après M. Roth (¹), les températures et pressions critiques de quelques gaz :

Gaz.	Températur critique.	Pression critique.
	°	atm
Protoxyde d'azote	36,4	73,07
Acide sulfureux	155,4	78,90
Chlorure d'éthyle	182,6	52, 6
Éther	190,0	36, 9

(¹) *Annales de Wiedemann*, XI, p. 1; 1881.

XXVIIe MANIPULATION.

MESURE DE LA DENSITÉ DES GAZ.

Théorie.

La densité d'un gaz est le rapport des poids de volumes égaux de ce gaz et d'air atmosphérique pris dans les conditions normales à 0° et 760^{mm} de pression.

La méthode adoptée par Regnault pour mesurer la densité des gaz consiste à effectuer les deux opérations suivantes :

1° Peser un ballon de 10^{lit} environ, maintenu à zéro, successivement rempli de gaz à une pression H voisine de 760^{mm} et à une pression h très faible;

2° Répéter les mêmes opérations sur l'air à deux pressions H' et h'.

Chacune de ces opérations fait connaître par différence le poids de gaz et d'air qui remplirait le ballon à zéro sous les pressions $H - h$ et $H' - h'$; si π et π' sont les deux poids ainsi obtenus, on a, en désignant par δ la densité cherchée,

$$\delta = \frac{\pi}{\pi'} \frac{H' - h'}{H - h}.$$

Par l'emploi de ballons compensateurs, Regnault a évité complètement les incertitudes produites dans les pesées par les changements de température, d'état hygrométrique et de composition survenus dans l'atmosphère pendant le cours de l'expérience.

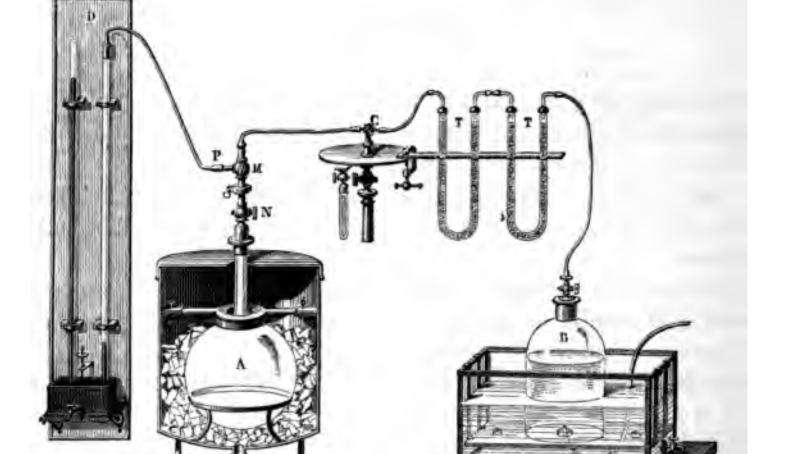
Description.

Cette expérience nécessite l'emploi d'un réservoir à gaz B (*fig.* 34), d'une série de tubes communiquants T, d'une ma-

chine à faire le vide, d'un ballon A et d'un manomètre barométrique.

Le ballon A qui doit renfermer le gaz porte une monture à robinet : elle permet à volonté de le mettre en communication avec les appareils divers que nous venons d'énumérer ou

Fig. 34.



bien de l'en séparer après l'avoir fermé, et de l'accrocher sous le plateau d'une balance (*fig.* 35).

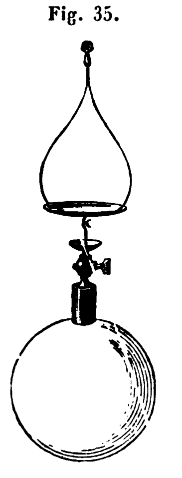
Pendant les opérations de remplissage et d'épuisement le ballon est entouré de glace fondante.

Le ballon compensateur est fabriqué avec le même verre que le ballon-laboratoire, et il présente exactement le même volume extérieur : pour réaliser cette dernière condition on est obligé de procéder à un essai préalable. Les ballons étant lestés par du mercure ou de la grenaille, on détermine la perte

de poids qu'ils éprouvent quand ils sont plongés dans l'eau. Supposons que le poids de l'eau déplacée par le second ballon muni de sa monture soit inférieur de p grammes au poids de l'eau déplacée par le premier, muni également de sa monture; on accroche alors au second ballon une ampoule de verre déplaçant rigoureusement $\frac{1}{2}$ centimètre cube.

Avant de fermer complètement le ballon compensateur, on y introduit une certaine quantité de mercure, de telle sorte que, lorsque les deux ballons pleins d'air sont accrochés sous la balance, il soit nécessaire d'ajouter environ 20gr du côté du ballon à robinet pour établir l'équilibre. Cet artifice permet d'opérer par double pesée, avec les gaz les plus denses.

Fig. 35.



La balance est placée au-dessus d'une armoire vitrée dont l'air est desséché par la chaux vive; c'est dans cette atmosphère à température uniforme que s'effectuent les pesées.

Le manomètre barométrique de Regnault est bien connu : faisons remarquer seulement que la cloison qui divise la cuvette en deux compartiments est nécessaire à la conservation du baromètre, car l'instrument serait bientôt vicié par les rentrées d'air qu'on ne peut éviter quand le mercure subit de fortes oscillations.

Après chaque opération d'épuisement ou de remplissage, l'état thermique du gaz se trouve notablement modifié par le fait même de sa détente ou de sa compression : un certain temps est nécessaire pour que le gaz revienne à la température de la glace fondante; on se gardera donc d'en retirer le ballon aussitôt après le travail de la pompe.

Il faut craindre de frotter le verre avec un linge sec, car on l'électrise d'un façon marquée, et Regnault a constaté de ce chef des augmentations de $\frac{3}{4}$ de gramme : au bout d'une heure, il reste une surcharge de 0gr,15 et, après cinq heures, un ballon pèse encore 0gr,01 de plus que son poids véritable.

On essuiera donc les ballons avec une serviette légèrement humectée par de l'eau distillée et il sera prudent de s'assurer,

avant de procéder aux pesées, que les ballons ne présentent pas trace d'électricité, en approchant d'eux un électroscope à feuilles d'or.

Manuel opératoire.

1° Le vide étant fait dans le ballon aussi complètement que possible, on le met en communication avec l'appareil qui produit le gaz dont on cherche la densité, ou bien avec le réservoir dans lequel on l'a recueilli, et l'on ouvre le robinet de telle façon que le gaz conserve un excès de pression qui lui permette de surmonter la résistance des tubes desséchants.

Le remplissage fait, le ballon est mis de nouveau en communication avec la machine pneumatique, et l'on y fait un vide parfait; puis on le remplit une seconde fois. Cette opération s'exécute à zéro. Avant de fermer le ballon, on le met en communication immédiate avec l'atmosphère, et l'opérateur note la pression H.

2° Le ballon sorti de la glace est lavé avec de l'eau, puis essuyé; on le suspend au crochet de la balance, après qu'il a pris la température de la salle, ce qui peut exiger deux heures. Les ballons compensés sont alors couverts d'une même quantité d'humidité. La tare est complétée par un certain nombre de poids marqués, placés du côté du ballon-laboratoire.

3° Le vide est fait dans le ballon à 4^{mm} environ, et on le reporte sur la balance, après avoir noté la pression h. Le poids π qu'il faut ajouter exprime le poids du gaz à zéro sous la pression $H - h$.

4° Les mêmes opérations sont répétées sur l'air : on note H', h' et π'.

Résultats.

Voici les chiffres d'une expérience faite par Regnault sur l'acide carbonique.

Ballon plein d'acide carbonique.

Hauteur du baromètre réduite à zéro au moment de la fermeture du robinet	$H = 759^{mm},13$
Poids ajouté au ballon	$p = 0^{gr},736$

élastique du gaz resté dans le ballon au moment
a fermeture du robinet........................ $h = 1^{mm},57$
ajouté au ballon.................... .... $P = 20^{gr},211$
π du gaz enlevé par la machine = P — p....... $19^{gr},475$

Ballon plein d'air.

plein d'air à la pression de l'atmosphère....... $H' = 747^{mm},21$
ajouté.................................... $p' = 1^{gr},699$
vide d'air, à la pression..................... $h' = 7^{mm},56$
ajouté.................................... $P' = 14^{gr},345$
$\pi' = P' - p'$.................................. $12^{gr},435$
té de l'acide carbonique...................... $\delta = 1,52901$

s élèves répétant cette expérience doivent trouver le
re des centièmes exacts.

Densités des gaz

(*Annuaire du Bureau des Longitudes*).

Air..............................	1
Oxygène..........................	1,10563
Azote............................	0,97137
Hydrogène........................	0,06926
Acide carbonique..................	1,52901
Ammoniaque.......................	0,597
Acétylène........................	0,920
Éthylène ou gaz oléfiant............	0,971
Formène ou gaz des marais..........	0,558
Protoxyde d'azote..............	1,527
Bioxyde d'azote....................	1,039

XXVIIIe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DU POIDS DU LITRE D'AIR.

Théorie.

a manipulation précédente nous a déjà fait connaître le
ds π' de l'air contenu dans le ballon de Regnault, à une

pression $H' - h'$, voisine de $0^m,760$; le poids x à la pression normale s'en déduit par une application légitime de la loi de Mariotte :

$$x = \pi' \frac{760}{H' - h'}.$$

Il n'y a donc qu'à mesurer le volume intérieur du ballon à zéro; ce jaugeage se fait à l'eau et avec une balance de Deleuil, disposée pour peser 10^{kg} au $\frac{1}{2}$ centigramme près; un opérateur habile peut obtenir une approximation égale à $\frac{1}{2000000}$.

Soient p le poids du ballon ouvert non compensé par un ballon semblable; P le poids apparent du même ballon plein d'eau distillée à 0°, alors que la pression, la température et l'état hygrométrique de l'air extérieur sont H, t et E; le poids vrai de l'eau sera égal à

$$P - p + x(1 + Kt)\frac{H - \frac{3}{8}EF}{760}\,\frac{1}{1 + \alpha t}.$$

On prendra pour K la valeur 0,0000235 adoptée par Regnault dans cette expérience.

Nous avons négligé d'introduire dans l'équation la variation de la poussée de l'air sur le verre du ballon entre les deux pesées, car cette différence ne dépasse jamais $0^{gr},001$, et il serait puéril d'en tenir compte, eu égard à la précision limitée de la balance.

Ayant donc calculé le poids vrai de l'eau par l'équation ci-dessus, il reste à le diviser par 0,999878, densité de l'eau à zéro, pour connaître son volume V_0, et le poids du litre a sera le quotient de x par V_0 :

$$a = \frac{x}{V_0}.$$

Enfin le poids normal du litre d'air, c'est-à-dire le poids correspondant à la pression barométrique qui serait mesurée sous le parallèle de 45° et au niveau de la mer, par une colonne mercurielle de $0^m,760$ de hauteur à zéro, aura pour expression

$$a = \frac{x.G_{45}}{V_0 G}.$$

Description.

Il nous reste à décrire le dispositif spécial employé pour remplir le ballon d'eau bouillie entièrement purgée d'air; audessus du robinet on fixera, à l'aide d'un tube de caoutchouc épais, un siphon de verre deux fois recourbé, dont l'extrémité libre puisse plonger au fond d'une chaudière contenant de l'eau distillée en pleine ébullition. Ce tube sera remplacé dans la suite de l'opération par un ajutage à boule, où l'on versera de l'eau bouillie au fur et à mesure du refroidissement du ballon.

Manuel opératoire.

1° Le poids x est déduit par le calcul du poids observé précédemment π'.

2° Le ballon lavé et desséché est pesé ouvert.

3° On y introduit une petite quantité d'eau distillée, et l'on fait le vide avec la machine pneumatique, en accélérant l'évaporation par l'action d'une douce chaleur; lorsque l'air aura été complètement expulsé, le robinet sera fermé, et l'on fixera le siphon déjà rempli d'eau chaude sur la tubulure supérieure. L'eau passera certainement du fond de la chaudière dans le ballon sans éprouver nulle part le contact de l'air; puis le siphon sera remplacé par le tube à boule, qui restera constamment plein d'eau jusqu'à ce que le ballon soit définitivement à zéro. Il faudra pour cela une dizaine d'heures d'immersion dans la glace fondante;

4° Le ballon est fermé, lavé, essuyé et pesé; cette dernière opération doit se faire dans une salle dont la température reste inférieure à 9°; si d'une part, en effet, il est indispensable que le récipient soit réchauffé à la température ambiante, d'autre part il est impossible de dépasser 9°, car la dilatation de l'eau briserait infailliblement le verre.

Résultats.

A Paris, dans le laboratoire du Collège de France, qui est à une altitude de 60^m et à une latitude de 48° 50′ 14″, le litre d'air pèse 1^gr,29320.

A Berlin, à 40^m d'altitude et par 52°30′17″ de latitude, le poids du litre est un peu plus considérable, 1gr,29361.

Le poids normal serait exactement 1gr,29278.

XXIXe MANIPULATION.

MESURE DE LA DENSITÉ DES VAPEURS.

Théorie.

M. Dumas a indiqué, en 1826 (1), une méthode très simple, qui est seule employée aujourd'hui dans les laboratoires : elle consiste à remplir de la vapeur que l'on veut étudier un ballon, d'une capacité connue, sous la pression de l'atmosphère et à une température quelconque, supérieure au point d'ébullition du corps.

En déterminant le poids de la substance renfermée dans le ballon et la capacité de celui-ci, on possède toutes les données nécessaires au calcul de la densité.

En effet, soit π la tare du ballon ouvert et communiquant librement avec l'atmosphère ; appelons P le poids apparent du ballon plein de vapeur, V_0 sa capacité à zéro, T la température du bain liquide, t la température ambiante, H la pression de l'atmosphère au moment de la fermeture du ballon, H′ la pression au moment de la pesée, et E′ l'état hygrométrique, nous aurons la relation

$$(1)\quad \left\{\begin{aligned} P(-\pi) &= V_0(1+KT)\,1{,}293\,x\,\frac{H}{760}\,\frac{1}{1+\alpha T}\\ &\quad - V_0(1+Kt)\,1{,}293\,\frac{H'-\frac{3}{8}E'F}{760}\,\frac{1}{1+\alpha t},\end{aligned}\right.$$

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, XXX, p. 337 ; 1826.

dans laquelle x est la densité cherchée ; on fait généralement $K = 0,0000235$.

Le volume V_0 se détermine par une pesée d'eau ; si P' est le poids apparent du ballon plein d'eau à une température θ, et D_θ le poids spécifique du litre d'eau à cette température, son volume est donné par l'équation

$$(2)\quad P'(-\pi) = V_0(1+K\theta)\left(D_\theta - 1,293\,\frac{H'' - \frac{3}{8}E''F}{760}\,\frac{1}{1+\alpha\theta}\right).$$

Ces deux formules sont rigoureusement exactes ; nous n'avons négligé dans la formule (1) que la différence des poussées exercées par l'atmosphère sur le verre de l'enveloppe ; or elle est toujours moindre que $\frac{1}{10000}$ de gramme, et le plus souvent elle est nulle. La formule (2) permet d'évaluer V_0 à 1^{mmc} près.

On simplifie souvent cette opération en jaugeant dans une éprouvette graduée l'eau contenue dans le ballon à la température θ : dans ce cas, le volume est connu au demi-centimètre cube près, et il devient inutile de faire la correction due à l'état hygrométrique ; de plus, dans l'équation (1), on remplace $V_0(1+KT)$ par $V_\theta[1+K(T-\theta)]$ et $V_0(1+Kt)$ par V_t. Cette manière de procéder donne des résultats exacts à deux unités du chiffre des centièmes.

Quelques auteurs proposent de mesurer sur la cuve à mercure le volume d'air qui, accidentellement, peut rester dans le ballon, et d'en calculer le poids : cette correction me paraît déplacée. Si ce volume est petit, la correction est négligeable ; sinon l'opération est manquée, et elle doit être recommencée.

Description.

Cette manipulation exige un matériel peu dispendieux, consistant en une collection de ballons spéciaux en verre mince à pointe effilée, un bain-marie et un support annulaire destiné à maintenir le ballon sous l'eau (*fig.* 36).

La capacité du ballon peut varier de 300^{cc} à 500^{cc} ; sa pointe effilée doit avoir une longueur d'au moins 150^{mm}.

Le support est muni de douilles pour recevoir deux thermomètres robustes, marquant le degré; on en fait des agitateurs au cours de l'expérience.

Dans un grand nombre de cas, l'eau peut être employée comme bain liquide, car il suffit de dépasser le point d'ébullition de 20°; l'eau est donc indiquée pour le chloroforme, l'éther et le sulfure de carbone; pour l'alcool, on se servirait d'une solution saturée de chlorure de calcium. L'acide sulfurique concentré permet d'atteindre 200°, température suffi-


Fig. 36.



sante pour l'iode; l'acide, chauffé dans un vase de verre, convient mieux que l'huile de pied de bœuf, qui donne des vapeurs incommodes et salit les appareils. Enfin l'alliage de d'Arcet ($8\,Bi + 5\,Pb + 3\,Sn$) a été employé par M. Dumas pour déterminer la densité de la vapeur de mercure; en plaçant des fragments de cet alliage dans la bassine de fonte et en chauffant lentement jusqu'au point de fusion, inférieur à 100°, on n'a pas à craindre de briser les ustensiles de verre. La mince couche de métal dont le ballon reste couvert après refroidissement se détache aisément au couteau, et le nettoyage se termine au moyen du mercure, qui dissout les quelques parcelles demeurées adhérentes.

Le chloroforme, dont la densité de vapeur est considérable

et le point d'ébullition au-dessous de 65°, offre de grandes facilités d'expérience qui l'ont fait choisir, préférablement à tout autre liquide, pour habituer les élèves au maniement des appareils que nous venons de décrire ; sa vapeur forme un jet parfaitement visible au sortir de la pointe effilée du ballon, et le moment convenable pour la fermeture de la pointe est facile à saisir.

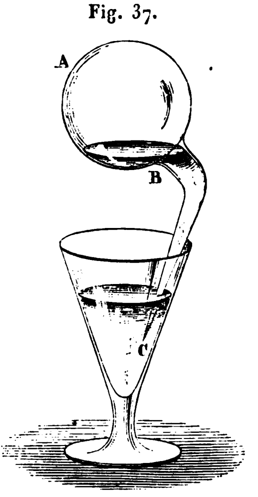
Manuel opératoire.

1° L'extérieur du ballon est lavé, essuyé et desséché ; puis on en casse la pointe et l'on fait la tare avec addition de 2gr.

2° On y introduit le liquide.

Ce remplissage se fait comme pour les thermomètres ; quand le liquide est peu dense, il suffit quelquefois de chauffer l'enveloppe entre ses mains, mais le plus souvent l'opérateur devra se servir d'une lampe, et alors il aura une précaution à prendre. En effet, si le liquide volatil venait à toucher une portion de paroi chaude, la tension de sa vapeur arrêterait subitement l'ascension dans le tube. On n'exposera donc à la flamme que la partie A de la surface sphérique diamétralement opposée à la partie effilée et, en renversant le ballon sur le liquide, on veillera à ce qu'il ne puisse atteindre aucun point chaud (*fig.* 37). Dès qu'on jugera que le ballon renferme environ 10cc de la substance à essayer, on le retournera vivement.

Fig. 37.



3° Le ballon est placé dans le bain, la pointe en l'air, de manière que le jet de vapeur qui va s'en échapper soit bien visible et que le tube puisse être commodément fermé au chalumeau ; il est essentiel que tout le ballon soit immergé.

La température du bain doit s'élever assez vivement jusqu'à

10° ou 12° au-dessous du point d'ébullition du liquide; m
à ce moment il faut modérer le feu pour que l'écoulem
de la vapeur ne soit point trop rapide. On porte ainsi p
gressivement la température jusqu'à 20° au-dessus du po
d'ébullition sans permettre qu'elle vienne à baisser ni mêm
rester stationnaire, si ce n'est lorsqu'on est parvenu au ter
où l'on veut s'arrêter. Alors, l'équilibre étant établi et le
devenu invisible, on note aussitôt la température du ba
ainsi que la pression barométrique et, d'un trait de cha
meau, on ferme la pointe.

Dans certains cas, la pointe du ballon peut être obstruée p
des dépôts solides ; il en est ainsi pour l'iode. Il suffit de p
mener un charbon autour du tube pour empêcher la crist
lisation de se produire.

4° Après refroidissement complet et lavage du ballon, l'o
rateur procède à la pesée de la vapeur par différence. Il rel
en même temps la pression, la température et l'état hygron
trique de l'air ambiant.

5° La pointe est cassée sous l'eau ; si cette eau est enti
ment purgée d'air et que d'autre part l'opération ait été b
conduite, le liquide envahit brusquement toute la capacité
l'enveloppe, et il ne reste à la partie supérieure qu'une b
d'air de 1^cc ou 2^cc, dont on peut ne pas tenir compte.

6° On prend enfin pour la dernière fois le poids de l'appa
plein d'eau, à une température θ, qu'il faut noter en mê
temps que les diverses conditions de l'air extérieur ; ou b
on donne un trait de lime sur le col du ballon, à la naissa
du cône, on casse le tube et l'on verse l'eau dans une épr
vette graduée, sans négliger la capacité de l'extrémité q
été détachée.

Résultats.

Le procédé de M. Dumas ne peut être appliqué, selo
remarque de Buignet, qu'à des liquides chimiquement pu
en effet, si l'on opère sur un mélange complexe, sa com
sition est modifiée par le départ des portions les plus v
tiles.

Densité des vapeurs.

	Densités.	Températures.
Alcool absolu	1,61	78°,4
Benzine	2,77	92,0
Chloroforme	4,20	60,8
Eau	0,64	100,0
	0,67	180,3
Éther ordinaire	2,59	35,5
Sulfure de carbone	2,64	48,2
Iode	8,72	175
Mercure	6,98	350

XXXe MANIPULATION.

MESURE DES TENSIONS MAXIMA DES VAPEURS, INFÉRIEURES A 300 MILLIMÈTRES.

Théorie.

La relation qui existe entre les températures d'une vapeur saturée et ses tensions maxima a été déterminée par Regnault : l'objet de cette manipulation et de la suivante est de répéter ses remarquables expériences.

En principe, il s'agit d'établir une température constante dans l'enceinte qui renferme la vapeur et d'en mesurer la pression.

Description.

Deux baromètres verticaux AB et A'B' (*fig.* 38), reposant dans une cuvette commune E, sont engagés par leur extrémité supérieure dans une caisse métallique, percée d'une fenêtre fermée par une glace à faces parallèles. L'un de ces baromètres ne présente aucune particularité; l'autre se termine par un raccord (*fig.* 39) qui le met en communication avec

un ballon A : le tube B qui est relié à la machine pneu tique peut être fermé par un robinet ou bien fondu au (lumeau. Une lampe à alcool D permet d'échauffer l'eau d

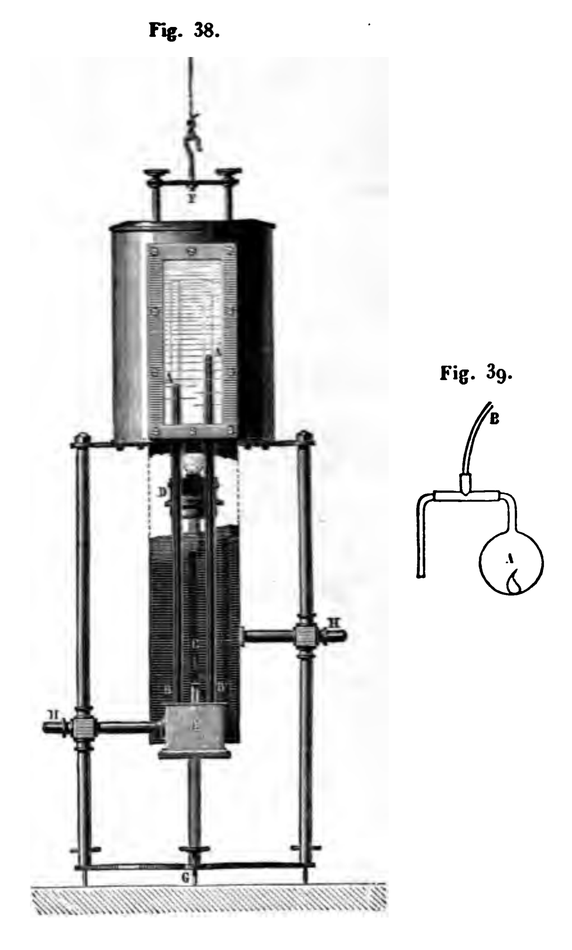


Fig. 38.

Fig. 39.

caisse, et des agitateurs rendent la température unifo L'observation des différences de niveau se fait au catl mètre; un thermomètre à mercure donne les températur bain, qu'on maintient facilement constantes, vu la gr masse d'eau qui a emmagasiné la chaleur du foyer.

Les corrections de température portent sur les différences de hauteurs qu'on ramène à zéro par la formule connue. Les corrections de capillarité s'apprécient directement sur deux tubes identiques à ceux de l'appareil, qu'on met en communication par leur partie supérieure avec un réservoir d'air à une pression moindre que l'atmosphère; on fait passer dans l'un d'eux un léger excès du liquide soumis à l'expérience et l'on mesure la différence de niveau qui s'établit dans les deux tubes. Dans un tube de $0^m,015$ de diamètre, la colonne mouillée se trouve soulevée par l'action capillaire de l'eau de $0^m,00012$. Indépendamment de cette correction, il faut encore tenir compte du poids du liquide superposé au ménisque mercuriel : la hauteur de cette colonne, divisée par 13,59, sera ajoutée à la hauteur observée du mercure dans un baromètre mouillé par l'eau.

Le liquide à vaporiser est enfermé dans une petite ampoule en verre très mince.

Sa confection est assez difficile : après avoir soufflé une sphère au bout d'un tube, on la sépare par étirement, puis on la remplit de liquide comme nous l'avons pratiqué pour les thermomètres. On présente ensuite la partie effilée à la flamme d'un brûleur et on la chauffe avec beaucoup de précautions jusqu'à ramollir et souder le verre : l'ampoule se brise souvent avant d'être fermée. Il est absolument nécessaire qu'aucune trace d'air ne reste logée à la pointe et que le petit récipient soit entièrement rempli d'un liquide récemment bouilli.

Manuel opératoire.

1° L'ampoule étant introduite dans le ballon et les joints serrés, on opère un grand nombre de fois le vide dans l'appareil et l'on y laisse rentrer très lentement de l'air sec : Regnault répétait cette opération cinquante fois.

2° Le vide est fait une dernière fois à $0^m,002$ ou $0^m,003$ et le tube B (*fig.* 38) est fermé; puis on remplit la caisse de glace fondante et l'on prend la différence de hauteur des deux colonnes de mercure avec le cathétomètre : c'est la force élastique de l'air sec resté dans le ballon.

3° Chauffant alors progressivement la caisse jusqu'à 50°,

température insuffisante pour faire crever l'ampoule, on mesure les différences de pression à 15°, 30° et 50°, ce qui donne la loi empirique des tensions de l'air. Elle est calculée avec soin.

4° La caisse est vidée, puis l'opérateur chauffe le ballon avec quelques charbons placés dans une cuiller à manche recourbé, et il détermine la rupture de l'ampoule par dilatation du liquide.

5° La mesure des dépressions à diverses températures peut dès lors être effectuée : la pression due à l'air seul sera retranchée et les corrections seront faites comme nous l'avons indiqué ci-dessus.

Résultats.

Pour coordonner les observations, on construira une courbe dont les abscisses soient les températures, et les ordonnées les tensions correspondantes : les points ainsi obtenus ne formeront pas une ligne continue, ainsi qu'on peut le voir sur *fig.* 40, mais ils définiront la forme générale d'une courbe qu'on tracera à la main en se laissant guider par le sentiment de la continuité.

Ce travail graphique permettra de déterminer la formule empirique qui exprime la loi des forces élastiques de la vapeur d'eau. Regnault a adopté la fonction

$$\log F = a + b\alpha^x + c\beta^x,$$

dans laquelle $x = t + 20$ et il a déterminé les cinq constantes qui entrent dans la formule au moyen des tensions relevées sur la courbe à cinq températures équidistantes.

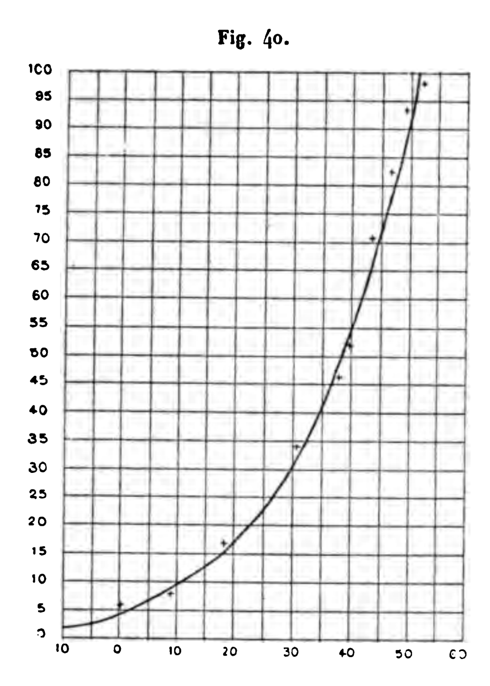
Les élèves répéteront ce travail avec le plus grand fruit en prenant dans leur tracé les pressions à 0°, 12°, 24°, 36° et 48°. Il faudra poser $\alpha^{12} = \alpha'$ et $\beta^{12} = \beta'$; il vient alors

$$\begin{aligned}
\log F_0 &= a + b \quad + c,\\
\log F_1 &= a + b\alpha' + c\beta',\\
\log F_2 &= a + b\alpha'^2 + c\beta'^2,\\
\log F_3 &= a + b\alpha'^3 + c\beta'^3,\\
\log F_4 &= a + b\alpha'^4 + c\beta'^4,
\end{aligned}$$

système d'équations qu'on peut résoudre par soustractions

uccessives et multiplications par α' et β', de manière à former

Fig. 40.



eux équations en $\alpha' + \beta'$ et $\alpha'\beta'$, d'où l'on déduit sans peine et β' et enfin a, b et c.

Regnault a trouvé

$$a = 6,2640348,$$
$$\log b = 0,1397743, \quad \log \alpha = \bar{1},9940493,$$
$$\log c = 0,6924351, \quad \log \beta = \bar{1},9983439.$$

Tension de quelques vapeurs saturées.

Températ.	Alcool.	Éther.	Sulfure de carbone.	Chlorure de carbone.	Acétone.	Chloroforme.
0°	12,70	184,39	127,91	32,95	63,33	59,72
10....	24,23	286,83	198,46	55,97	110,32	100,47
20....	44,46	432,78	298,03	90,99	180,08	160,47
30....	78,52	634,80	434,62	142,27	280,05	247,51
40....	133,69	907,04	617,53	214,81	419,35	369,26
50....	219,90	1264,83	857,07	314,28	608,81	535,05

XXXIe MANIPULATION.

MESURE DES TENSIONS MAXIMA DES VAPEURS, SUPÉRIEURES A 300 MILLIMÈTRES.

Théorie.

Cette méthode est fondée sur la loi de l'ébullition : la force élastique de la vapeur émise par un liquide bouillant est égale à la pression qui s'exerce à sa surface.

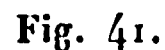
L'opération consiste donc simplement à déterminer la température à laquelle bout un liquide sous des pressions connues.

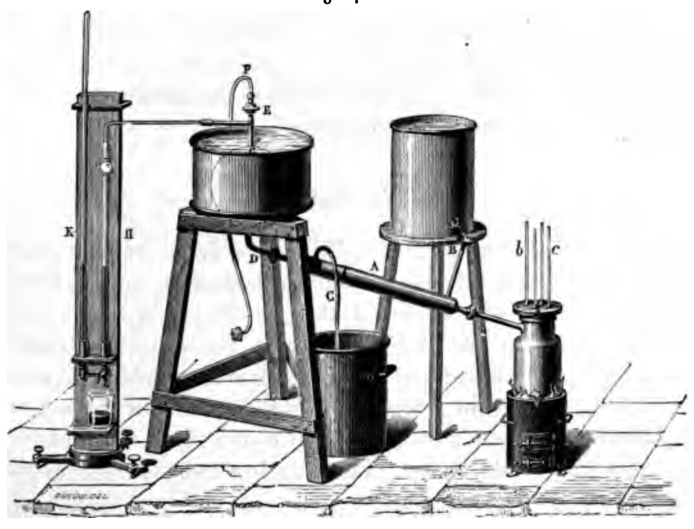
Description.

La chaudière dont s'est servi Regnault est une cornue en cuivre rouge (*fig.* 41) fermée par un couvercle boulonné, qui porte quatre tubes en fer fermés par le bas; deux de ces tubes plongent au fond de la cornue, les deux autres ne descendent que jusqu'au milieu. Le col de la cornue s'engage dans un tube A de 1^m environ de longueur, enveloppé d'un manchon en cuivre parcouru par un courant d'eau froide; ce tube communique avec un ballon en métal de 24^{lit} de capacité renfermé dans un vase plein d'eau à la température ambiante. Le ballon porte à sa partie supérieure un ajutage E à deux branches, par lequel il est mis en communication avec une pompe à air et avec un manomètre dont les dimensions dépendent de l'extension qu'on veut donner aux expériences.

Les quatre tubes en fer sont remplis de mercure jusqu'à une distance de quelques centimètres de l'orifice supérieur : des thermomètres à tige droite sont maintenus dans ces tubes et marquent les uns la température du liquide, les autres celle de la vapeur. La différence entre leurs indications peut s'élever jusqu'à 0°,7 dans les faibles pressions; elle devient nulle quand l'ébullition a lieu sous la pression de l'atmosphère ;

Regnault prenait la moyenne des quatre thermomètres. Les vapeurs qui se condensent dans le col de la cornue y retombent au fur et à mesure, de sorte qu'elle ne se vide jamais.


Fig. 41.



La pression de l'atmosphère artificielle, dans laquelle se produit l'ébullition, se mesure au cathétomètre; il est très facile de la maintenir invariable, et les observations se font avec une précision absolue et une facilité étonnante.

Manuel opératoire.

1° Après avoir déterminé dans le ballon la pression à laquelle on veut opérer, par le jeu de la machine pneumatique ou de la pompe de compression, un observateur mesure la différence de hauteur des colonnes mercurielles du manomètre; le ménisque a presque toujours un petit mouvement d'oscillation, d'un dixième de millimètre d'amplitude, dont il faut prendre la position moyenne.

2° Un second observateur lit en même temps les températures des thermomètres plongés dans la cornue. On recommence ces déterminations simultanées à quelques minutes

d'intervalle, pour s'assurer de la parfaite constance de la température et de la pression, et l'on procède ensuite à de nouvelles expériences sous des pressions différentes convenablement échelonnées.

3° Les températures doivent être corrigées pour la portion de colonne non plongée dans la chaudière : dans les recherches de Regnault le maximum de la correction n'a pas dépassé 0°,35. Les pressions sont déduites de la hauteur barométrique au moment de l'expérience.

Résultats.

Dans les tableaux des forces élastiques de la vapeur d'eau, publiés par Regnault, les tensions observées vers 100° diffèrent au plus de 1mm des résultats calculés par la formule exponentielle qui a été établie dans la manipulation précédente. Dans les laboratoires, on ne saurait atteindre une aussi remarquable pression : cependant de bons élèves obtiennent des résultats très encourageants qui témoignent de la perfection de la méthode. Cette manipulation est assurément une des plus belles de la série.

Forces élastiques de la vapeur d'eau
(d'après Regnault).

H.	T.	H.	T.	H.	T.	H.	T.	H.	T.	H.	T.	H.	T.
mm	o	mm	o	mm	o	mm	o	mm	o	mm	o	mm	o
710	98,11	720	98,49	730	98,88	740	99,26	750	99,63	760	100,00	770	100,36
1	15	1	53	1	92	1	29	1	67	1	04	1	40
2	19	2	57	2	95	2	33	2	70	2	07	2	44
3	22	3	61	3	99	3	37	3	74	3	11	3	47
4	26	4	65	4	99,03	4	41	4	78	4	15	4	51
5	30	5	69	5	07	5	44	5	82	5	18	5	55
6	34	6	72	6	11	6	48	6	85	6	22	6	58
7	38	7	76	7	14	7	52	7	89	7	26	7	62
8	42	8	80	8	18	8	56	8	93	8	29	8	65
9	46	9	84	9	22	9	59	9	96	9	33	9	69

CHAPITRE VII.

CHALEUR RAYONNANTE.

XXXII° MANIPULATION.

GRADUATION EXPÉRIMENTALE DU GALVANOMÈTRE.

Théorie.

L'intensité du courant qui prend naissance dans la pile thermo-électrique de Nobili est proportionnelle à l'excès de la température de la face exposée au rayonnement calorifique sur la température de l'air ambiant : or, lorsque l'équilibre thermique est établi, cet excès est lui-même proportionnel, d'après la loi de Newton, à la quantité de chaleur reçue. Mais il n'existe plus de rapport constant entre l'intensité du courant et l'indication du galvanomètre : en effet, l'amplitude de la déviation de l'aiguille dépend de la sensibilité du système astatique et de la distribution du fil sur le châssis, et elle varie avec la construction et avec l'état de l'instrument. C'est pourquoi il est nécessaire de graduer le galvanomètre et d'établir une table ou une courbe de relation entre les quantités de chaleur reçues et les déviations correspondantes de l'aiguille.

Plusieurs méthodes ont été proposées. La meilleure, à mon avis, est celle qui se pratique dans le laboratoire de M. Desains : elle consiste à doubler, tripler et quadrupler successivement les quantités de chaleur reçues par la pile et à noter les écarts correspondants de l'aiguille. Les angles sont d'abord

proportionnels aux forces; mais on observe bientôt que, pour une force double, l'angle ne croît plus, par exemple, que dans le rapport de 1,83; l'indication du galvanomètre devra donc être multipliée par $\frac{2}{1,83}$.

Il y a deux procédés d'observation du galvanomètre qu'il importe de définir aussitôt. Dès que le rayon calorifique frappe la pile, l'aiguille se met en mouvement, et elle parcourt en cinq ou six secondes un arc considérable; elle oscille ensuite pendant quelque temps et ne s'arrête définitivement qu'au bout d'une minute et demie à deux minutes environ. C'est cette position d'équilibre de l'aiguille qu'il conviendrait de relever : seulement une observation faite de la sorte serait extrêmement longue, car la pile, profondément échauffée, ne se refroidirait que lentement, et il faudrait dix minutes au moins pour que l'aiguille revînt à zéro. Melloni, ayant constaté que le premier arc est toujours le même pour une déviation définitive, modifia le procédé en n'observant que cet arc d'impulsion : il suffit dès lors d'une minute pour ramener l'aiguille à sa position initiale. Pour certains galvanomètres, la déviation impulsive est très voisine de l'écart définitif; pour d'autres instruments, il peut se présenter des différences de plusieurs degrés.

C'est entre les arcs d'impulsion ainsi entendus et les quantités de chaleur reçues par la pile que nous nous proposons de trouver une relation.

Description.

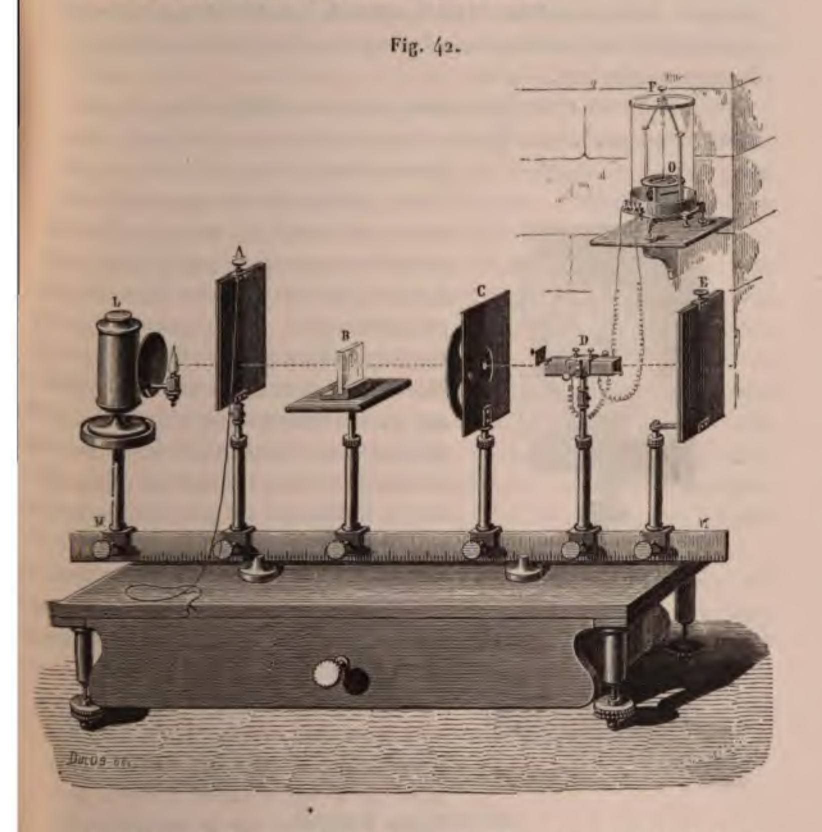
Nous ne nous arrêterons pas à décrire le banc de Melloni (*fig.* 42). Le galvanomètre à fil gros et court (diamètre = $0^{mm},3$ à $0^{mm},8$; 100 à 300 tours), enveloppé de soie blanche, doit être placé sur une crédence scellée au mur pour être à l'abri des trépidations du plancher.

M. de la Provostaye a recommandé ([1]) de ne pas employer d'aiguilles trop astatiques, parce qu'elles peuvent avoir deux ou plusieurs positions d'équilibre, et le retour au zéro devient pour-

([1]) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, LIV, p. 187; 1858.

ainsi dire impossible. Il est donc prudent de réduire la sensibilité jusqu'à ce que la force directrice suffise pour triompher des petites actions locales provenant du disque de cuivre audessus duquel oscille l'aiguille supérieure.

Fig. 42.



La pièce indispensable à la graduation est une lentille de crown à volets (*fig.* 43) enchâssée dans un large cadre métallique : chaque secteur forme un quadrant, de sorte qu'en abaissant ou en relevant les volets on puisse découvrir $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{4}$ ou $\frac{4}{4}$ de la surface de la lentille collectrice. Cet écran se monte sur le banc entre la source de chaleur et la pile, le centre à la hauteur de la pile ; il est nécessaire de connaître la distance focale de la lentille, pour calculer la position d'une série de

foyers conjugués par la formule

$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f};$$

on peut encore opérer dans la chambre noire avec un
et chercher les points où se forme une image bien ne
flamme renversée.

On a le choix entre plusieurs sources; Melloni empl
une lampe de Locatelli ou bien une lampe d'Argant
ble courant d'air et à nive
stant; lorsque ces appare
bien préparés et remplis
privée de mucilage par l'ac
furique, on obtient une flar
conserve une températur
riable pendant plus de deux
Mais il faut avoir soin d'
au moins quinze minutes
procéder à aucune expérier
donner au bec et à la chem
verre le temps de parven
maximum de température.
de Leslie, surmonté d'un lc
de dégagement de vapeur
une constance plus grande
mais c'est une source faib
la température ne peut pa
ser 100°. J'ai employé ave
une lampe à pétrole à be
laire et à verre étroit : il
facile d'opérer sur la radia
mineuse de cette source que sur le faisceau obscur é
cube, et la flamme reste bien égale lorsque la mèche
pée régulièrement.

Fig. 43.



Les écrans sont formés de deux lames en cuivre do
est polie, l'autre mate; on tournera la face polie vers

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, XLVIII, p. 191 (1
p. 5 (1833); LV, p. 337 (1836).

Un écran sera disposé tout contre le foyer et un autre à égale distance de la source et de la pile; le calcul démontre que c'est la position la plus convenable pour annuler les influences de conductibilité et de rayonnement. Le banc sera du reste installé loin des croisées, dans le milieu d'une salle sans feu, et on l'entourera d'une ceinture de paravents métalliques à double paroi, d'environ $0^m,60$ de hauteur; enfin toutes les pièces seront manœuvrées par des cordons.

On perd beaucoup de temps d'une expérience à l'autre, parce qu'il faut attendre le retour de l'aiguille au zéro; pour abréger ces intervalles d'inaction, Melloni découvrait la face postérieure de la pile et en approchait la main ou bien une bougie allumée. J'ai trouvé très avantageux de placer une faible source de chaleur à demeure à l'extrémité du banc; ouvrant de temps en temps le petit volet qui recouvrait la pile, j'ai pu travailler plusieurs heures de suite sans que le zéro se déplaçât sensiblement. Il arrive cependant quelquefois que l'aiguille ne revient plus au zéro; or, d'après M. Desains, on peut tolérer un écart de 1°; il est probable en effet que les causes auxquelles est dû ce dérangement persistent pendant toute la durée de l'expérience : on peut donc compter les déviations à partir du point où l'index s'est arrêté.

Enfin on observe parfois que l'aiguille s'écarte plus ou moins du zéro lorsqu'on s'approche pour lire les indications du galvanomètre. Il faut alors être fort en garde contre les objets de fer qu'on peut avoir dans sa poche ou sur ses habits, clefs, boutons, etc.; certaines perturbations, qu'on ne peut expliquer d'abord, n'ont souvent pas d'autre cause.

Manuel opératoire.

1° L'aiguille étant relevée, à l'aide du bouton F, à $0^m,002$ environ au-dessus du disque de cuivre, l'opérateur procède à la mise de niveau du galvanomètre : ce résultat est atteint lorsque l'aiguille oscille librement sans frotter sur aucune des parties du cadre et que son centre coïncide avec celui du cercle gradué. Puis il oriente l'instrument en le tournant sur lui-même, jusqu'à ce que l'index s'arrête au zéro du limbe.

Il devra y rester après que le galvanomètre aura été relié à la pile.

2° La source de chaleur, le centre de la lentille et la pile sont disposés sur une droite horizontale parallèle au banc; le plan de la lentille est perpendiculaire à cette direction; enfin la source et la pile occupent la position de deux foyers conjugués. Ces conditions vérifiées avec le plus grand soin, on abaisse les écrans et on lit la déviation de haut en bas, pour éviter les erreurs de parallaxe; l'arc d'impulsion ne doit pas dépasser 15°, les quatre volets étant ouverts, car il est rare que la proportionnalité des écarts subsiste au delà.

3° L'observateur répète la même expérience en relevant tour à tour, un, deux ou trois volets, et il note la déviation produite par chacun des secteurs.

4° En modifiant les positions de la pile et de la lentille, on augmente facilement la quantité de chaleur concentrée sur les soudures antérieures, parce que la lentille embrasse une portion plus ou moins grande du faisceau divergent émané du foyer. On peut atteindre ainsi une déviation de 40° à 60°.

Il faut au moins cinq observations successives pour établir chacun des nombres de la Table de réduction : le limbe n'est divisé qu'en degrés, mais le demi-degré s'apprécie au jugé, et on accepte le chiffre des dixièmes dans la moyenne arithmétique des résultats. L'erreur moyenne ne doit pas dépasser 1° : c'est la meilleure preuve de la constance de la source et de l'exactitude des observations.

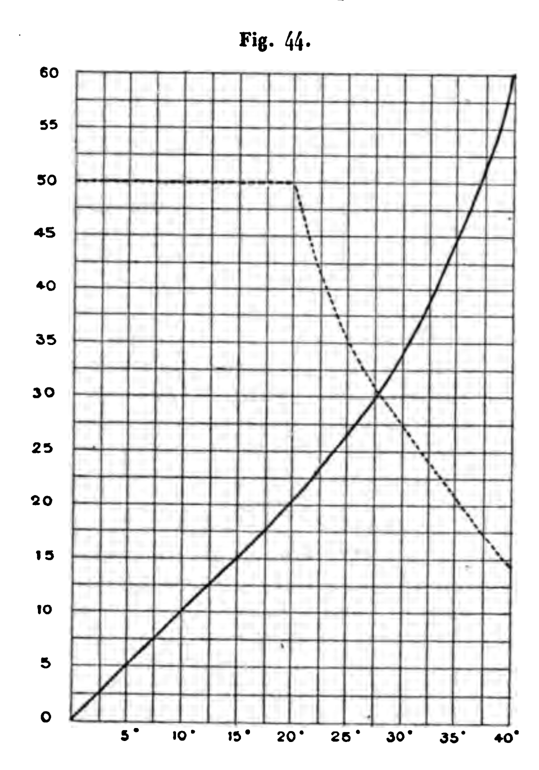
Résultats.

En opérant sur un galvanomètre médiocrement sensible, construit par la maison Ruhmkorff, nous avons trouvé les angles suivants de déviation, qu'il est utile de mettre sous les yeux des élèves :

Lentille découverte.	Secteurs découverts. 1.	2.	3.	4.	Total.
14°,9	7°,9		7°,0		14°,9
30,1	10°,2	8°,2	9°,0	7°,1	34,5
40,2	17°,3	14°,6	15°,7	12°,9	60,5

Ces observations, complétées par quelques autres intermédiaires, ont permis de tracer la courbe de graduation ci-dessous (*fig.* 44), en portant en abscisses les déviations observées avec la lentille découverte et en ordonnées les totaux qui représentent les intensités calorifiques des radiations. Cette

Fig. 44.



courbe, qui passe par l'origine, est rectiligne sur une partie de sa longueur, jusqu'à 17° environ; au delà, elle se relève rapidement et tourne sa convexité vers les x. La sensibilité de l'instrument décroît rapidement, ainsi qu'on peut s'en rendre compte en évaluant les arcs parcourus, aux différents points de la course de l'aiguille, en vertu d'une même force.

L'arc compris entre	15° et 20°	équivaut à une force.....	5
»	20 et 25	»	6,3

L'arc compris entre	25° et 30°	équivaut à une force	....	8,0
»	30 et 35	»	....	10,4
»	35 et 40	»	....	16,1

La courbe marquée par un trait pointillé est relative à sensibilité; il a suffi pour la tracer de porter en ordonnée, une échelle déterminée, les valeurs inverses des forces c pables de déplacer l'aiguille de 5°.

La graduation que nous venons de faire peut servir à la me sure des intensités des courants produits par des couples quel conques de faible résistance intérieure : malheureusemen l'expérience démontre que, dans ces galvanomètres à aiguille compensées, l'intensité magnétique varie d'une manière notable par des circonstances qu'il est aussi impossible de prévoir que de prévenir, de telle sorte qu'il soit absolument nécessaire de vérifier la courbe très fréquemment. Melloni a indiqué une méthode très ingénieuse de vérification qui peu servir à la graduation : elle consiste à faire agir d'abord directement sur la pile une source produisant une déviation moindre que 15°, et à interposer ensuite une lame de verre qui intercepte une partie de la chaleur, soit la moitié. On rapproche alors la source, de manière à obtenir une déviation plus considérable, de 30°, par exemple; puis on replace la lame d verre sur le chemin des rayons; la déviation devrait s'abaisse à 15°. Or je suppose qu'on observe un écart de 17°,7; on e conclura que les 30° équivalent à 2.17°,7 = 35°,4 : ce chiffr doit concorder avec celui de la Table précédemment calculée

M. Aymonnet[1] a appliqué cette méthode avec une grand habileté et il a démontré que la proportionnalité des intens tés aux déviations se poursuit quelquefois seulement jusqu 12°, mais que cette condition dépend de la distance de l'a guille supérieure au-dessus du disque de cuivre. Il y a don intérêt à ramener toujours l'aiguille à la position qu'elle occ pait lors de la graduation.

---

[1] *Journal de Physique*, 1879, p. 128.

XXXIIIe MANIPULATION.

SPECTROSCOPIE CALORIFIQUE.

Théorie.

L'étude de la distribution de la chaleur dans le spectre solaire présente un intérêt considérable depuis que MM. Fizeau et Foucault, Desains, Lamanski et Ed. Becquerel ont découvert et repéré les maxima et les bandes froides de la région infra-rouge.

La plus grande difficulté de cette manipulation est de former un spectre pur : il faut pour cela limiter l'étendue du foyer calorifique par une fente extrêmement étroite. Quand on opère sur la radiation solaire, la largeur de cette fente ne doit pas dépasser un demi-millimètre, d'après M. Desains ([1]), si l'on veut éviter toute superposition fâcheuse de rayons différents.

Cette limite n'est point applicable aux sources artificielles, dont l'intensité est toujours faible comparativement à celle du Soleil : on est dans ce cas obligé d'admettre la radiation par une ouverture de $0^{m},0008$ à $0^{m},001$. Il en résulte un mélange nuisible à l'étude des radiations calorifiques simples.

L'exploration du spectre se fait à l'aide d'une pile dont l'étui porte une ouverture linéaire; en théorie, cette fenêtre ne devrait pas avoir de largeur appréciable, afin de permettre d'isoler les raies sans chaleur, dont le champ du spectre est sillonné : en pratique, il faut compter avec les difficultés de construction de ces instruments. Mais il est possible de déterminer très approximativement, avec une ouverture de pile assez grande, les quantités de chaleur répandues dans des portions beaucoup plus petites que cette ouverture. Il suffit, par exemple, si l'on se sert d'une pile de $0^{m},001$ de largeur,

---

([1]) *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVII, p. 297 et 1097; LXX, p. 985, et LXXXIV, p. 285 ; 1868 à 1877.

de la faire avancer de $\frac{2}{10}$ en $\frac{2}{10}$ de millimètre et de tenir compte à chacun de ses pas de la portion du spectre qu'elle abandonne et de la portion nouvelle qu'elle embrasse. On y parvient en amenant d'abord la pile en un point tel que l'aiguille n'indique aucun effet calorifique; puis on la fait glisser par étapes successives égales à $\frac{2}{10}$ de millimètre. Appelons o, *a*, *b*, *c*, *d*, ... les indications du galvanomètre dans ce mouvement de progression :

		mm mm
o correspond à l'intervalle	....	o -1
a »	....	0,2-1,2
b »	....	0,4-1,4
c »	....	0,6-1,6
d »	....	0,8-1,8
e »	....	1,0-2,0
f »	....	1,2-2,2
g »	....	1,4-2,4
....	....	....

Il est évident que la déviation *a* est produite par l'intervalle 1 à 1,2; $(b-a)$ par 1,2 à 1,4; $(c-b)$ par 1,4 à 1,6; $(d-c)$ par 1,6 à 1,8; $(e-d)$ par 1,8 à 2; $(a+f-e)$ par 2,0 à 2,2; $(b-a+g-f)$ par 2,2 à 2,4, et ainsi de suite. Cette méthode élégante est due à M. Aymonnet [1].

Description.

La pile linéaire destinée à l'étude du spectre (*fig.* 45) est toujours à fente variable : on la monte généralement à crémaillère sur un chariot qui est conduit par une vis micrométrique, permettant d'apprécier le $\frac{1}{10}$ de millimètre.

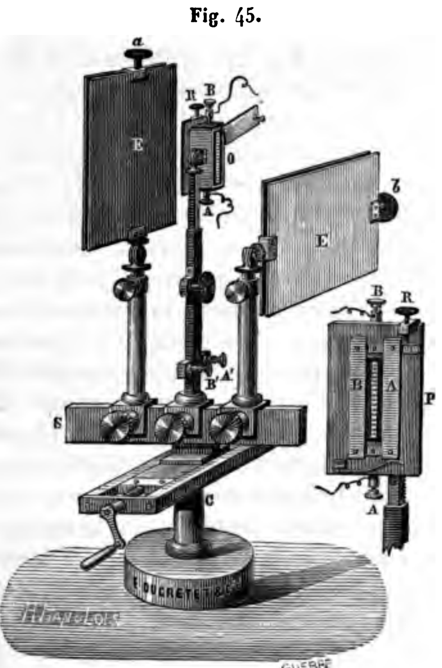
Quand on se propose de mesurer les angles auxquels correspondent les divers points du spectre, on fixe la pile à l'extrémité d'une alidade mobile de $0^m,600$ environ. Perpendiculairement à sa direction se trouve une petite règle d'ivoire finement divisée. M. Desains a décrit un instrument dans lequel cette division se trouve à $0^m,574$ du centre; le degré a

---

[1] *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXII, p. 1102; t. LXXXIII, p. 1153 (1876).

donc une longueur de $0^{m},010$ et le demi-millimètre vaut trois minutes. Par conséquent, pour mesurer à moins de trois minutes la valeur angulaire d'un déplacement de l'alidade, il suffit de compter le nombre de divisions de la règle qui passent devant un repère fixe pendant que s'accomplit le déplacement dont il s'agit.

Fig. 45.



M. Desains s'est astreint à donner même largeur à la fente qui limite l'étendue du foyer et à celle de la pile : cette largeur commune était ordinairement comprise entre $0^{m},0003$ et $0^{m},0006$. Quand on adopte le procédé Aymonnet, la fente de la pile peut avoir $0^{m},001$ d'ouverture.

Les sources calorifiques qu'on emploie communément sont les suivantes :

1° Un fil de platine au cerise clair, chauffé par un brûleur Bunsen;

2° Une flamme de gaz formant un papillon qu'on présente en long devant la fente d'admission;

3° Une lampe à modérateur ou bien une lampe à pétrole à bec annulaire;

4° Une lampe de Drummond;

5° Une lampe aérhydrique Bourbouze et Wiesnegg;

6° Un régulateur Duboscq;

7° Le Soleil.

La lampe Bourbouze doit être préférée dans les laboratoires d'enseignement : elle se compose d'une sorte de dé en tissu de platine, à mailles serrées, que l'on porte à une vive incandescence à l'aide d'une flamme de gaz alimentée par un jet d'air comprimé fourni par une trompe hydraulique de Sainte-Claire Deville ou de Damoiseau : le courant d'air doit avoir une pression d'au plus $0^m,200$ de mercure. Le maximum d'éclat et de chaleur de cette source correspond toujours à son minimum de sonorité : à ce moment la combustion paraît avoir lieu dans le cylindre seul. Les trompes exigent une pression de 10^m d'eau environ, pour qu'on puisse régler le débit d'air d'une manière bien constante. Pour comparer les températures successives de ce foyer, M. Aymonnet place à $0^m,65$ un actinomètre thermo-électrique; ses indications doivent rester invariables pendant le cours des expériences.

M. Desains se sert d'une lentille, dont la distance focale est de $0^m,150$; il la place à $0^m,280$ de la source pour former une image nette à environ $0^m,300$. Un prisme équiangle est disposé tout contre cette lentille, à la déviation minimum du rouge sombre.

Quand on opère sur les rayons solaires, on peut employer sans grand inconvénient une lentille et un prisme de flint; mais il est préférable que la substance dispersive soit du sulfure de carbone, de la sylvine ou du sel gemme. Pour les sources peu intenses, il est absolument nécessaire que tout l'appareil réfringent soit de sel gemme ou de sylvine.

Il convient que la partie obscure du spectre ait au moins $0^m,015$ à $0^m,020$ de long.

Dans ces conditions, les raies de Fraunhofer s'observent très bien dans la région lumineuse, pourvu toutefois que les surfaces réfringentes soient nettes : à cet égard, les lentilles

et les prismes de flint sont d'un usage très commode, qui peut compenser en certains cas l'inconvénient qu'ils présentent de diminuer l'intensité des effets et surtout de ne pas former de spectre normal.

Manuel opératoire.

1° Les appareils étant installés, l'opérateur explorera le champ du spectre en faisant avancer la pile linéaire et en relevant les positions successives du chariot ou de l'alidade mobile. Il est préférable d'observer les déviations définitives de l'aiguille du rhéomètre plutôt que les arcs de première impulsion, contrairement à ce qui se pratique généralement dans les mesures de chaleur rayonnante.

2° On construit la courbe des intensités calorifiques.

Résultats.

Le spectre solaire présente dans sa région obscure trois minima d'intensité nettement accusés et, par conséquent, quatre maxima successifs.

Leur position dépend de la nature des appareils réfringents employés, mais on observe une très faible différence entre le flint et le sel gemme. Les variations qui ont été signalées paraissent tenir surtout à l'action absorbante de l'atmosphère, dont la composition et l'épaisseur ne sont pas constantes : de 9^h du matin à midi, M. Desains a constaté des déplacements de 8′ dans la position des minima. La *fig.* 46 représente le spectre observé par M. Lamanski, le 11 septembre 1871, entre 10^h et $12^h 50^m$, avec une lentille et un prisme de sel gemme; j'ai porté en abscisse les pas de la vis micrométrique (le pas $= 0^{mm},469$) et en ordonnée les indications du thermomultiplicateur [1].

L'aire de la courbe représentant l'intensité de la chaleur obscure est environ les $\frac{2}{3}$ de l'aire totale.

Dans le spectre des sources artificielles, le maximum est

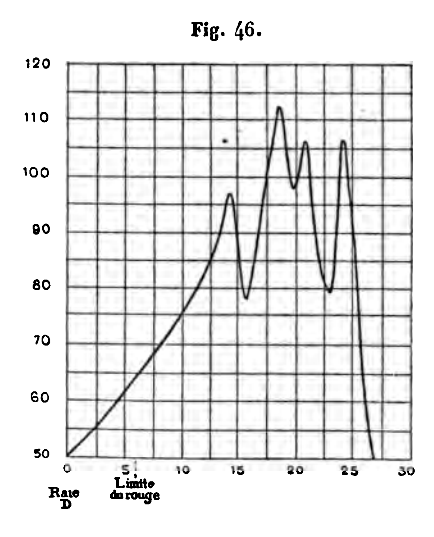
---

(1) LAMANSKI, *Annales de Poggendorff*, CXLVI, p. 200 (1872); — DESAINS, *Journal de Physique*, t. I, p. 335; 1872.

d'autant plus rapproché de la partie la moins réfrangible que la température de la source est plus basse ; ainsi le point le plus chaud du spectre de la lampe Bourbouze est à 1°15′ du rouge vif, alors qu'avec le même appareil réfringent disposé identiquement il était à 51′ dans le spectre solaire (Desains).

Le spectre normal de la chaux incandescente n'offre pas de minima successifs; mais si, avant de disperser les rayons de cette source par un prisme de sel gemme, on les fait passer

Fig. 46.



à travers une auge de verre de $0^m,010$ d'épaisseur, pleine soit d'eau pure, soit d'une solution de sulfate de didyme, on trouve des bandes d'absorption aussi nettement accusées que les minima du spectre solaire.

La chaleur lumineuse émanée d'un fil de platine incandescent est une portion insignifiante de la chaleur obscure ; dans la radiation de l'arc voltaïque, la chaleur lumineuse est environ le sixième de la chaleur obscure; cette proportion est donc croissante avec l'intensité de la source.

Isolons dans des spectres bien purs des faisceaux formés de rayons dont les déviations à travers un même prisme soient identiques entre elles, ces faisceaux seront très inégalement transmis à travers un même absorbant s'ils proviennent de

ources différentes. Ainsi les $\frac{22}{30}$ des radiations obscures émises ar le platine sont absorbés par une couche d'eau de $0^m,002$ 'épaisseur, tandis que M. Desains n'a pu trouver de rayons olaires complètement dépourvus de transmissibilité à travers eau.

Toutes ces expériences peuvent être répétées sans difficulté et avec le plus grand profit pour les élèves.

XXXIVe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DES POUVOIRS DIATHERMANES.

Théorie.

Le pouvoir diathermane d'un corps est défini par le rapport entre les quantités de chaleur qu'il transmet et les quantités qu'il reçoit.

En opérant sur une radiation simple, prélevée dans le spectre, on peut se proposer de déterminer le coefficient de transmission d'une substance pour cette radiation; car, si nous appelons I la quantité de chaleur reçue, I′ la quantité transmise, e l'épaisseur de la substance en millimètres et α le coefficient cherché, on peut écrire

$$I' = I\alpha^e.$$

Description.

Le banc de Melloni doit être complété par une petite tablette destinée à recevoir les corps soumis à l'expérience.

Les solides seront taillés en lames à faces planes et rigoureusement parallèles; on renfermera les liquides dans une auge de verre, de spath-fluor ou de quartz, formée par un assemblage de plaques taillées, enchâssées dans une monture métallique.

On dispose souvent entre la pile et les sources une lentille de crown pour concentrer la radiation ; mais il faut remarquer que l'interposition de cet appareil réfringent modifie la composition de la radiation émanée de la source.

Manuel opératoire.

1° On mesure l'effet produit directement par la source sur la pile : la déviation de l'aiguille ne doit pas dépasser 30°.

2° On place la substance diathermane entre la source et la pile et l'on observe la déviation qui se produit dans ces conditions.

3° Pour éviter les erreurs qui pourraient provenir d'une variation de la source dans l'intervalle des deux mesures, on répète la première et l'on effectue la moyenne des deux déviations obtenues directement.

Il reste à évaluer le rapport des quantités de chaleur reçues ou transmises en recourant à la Table de graduation du rhéomètre et à calculer α^e si l'on a opéré sur un faisceau homogène.

Quand on essaye un liquide, il faut faire une expérience préalable sur l'auge vide, afin de défalquer l'effet des lames qui forment les parois du récipient.

Résultats.

Corps solides

(Épaisseur $2^{mm},6$).

	Lampe de Locatelli.	Cube de Leslie à 100°.
Sel gemme	0,92	0,92
Fluorure de calcium	0,78	0,33
Verre de glace	0,39	0,00

Corps liquides

(Épaisseur $12^{mm},25$).

	Lampe de Locatelli.	Cube de Leslie à 100°.
Sulfure de carbone	1,26	1,15
Alcool	0,28	»
Eau distillée	0,19	»

Le résultat paradoxal présenté par le sulfure de carbone est dû à la grande réfringence de ce liquide, qui rapproche de la normale les rayons divergents.

XXXVe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DES POUVOIRS ÉMISSIFS.

Théorie.

Leslie avait choisi pour unité des pouvoirs émissifs celui du noir de fumée : ce terme de comparaison a été conservé, parce que les valeurs relatives ainsi calculées sont sensiblement égales aux pouvoirs absolus.

Pour déterminer le pouvoir émissif des corps, il suffit d'en recouvrir les faces d'un cube porté à une température élevée, de tourner successivement vers le thermo-multiplicateur une face ainsi préparée, et une face noircie au noir de fumée mat; le rapport des déviations galvanométriques observées est le pouvoir émissif cherché.

Quand on opère sur les métaux polis, on constate qu'il faut nécessairement réduire l'effet produit par la surface noircie et observer au contraire l'action totale de la surface métallique. Cette méthode, imaginée par MM. de la Provostaye et Desains (1), suppose l'emploi de diaphragmes à ouvertures graduées.

La déviation de l'aiguille dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de l'étendue de la surface qui rayonne vers la pile; en faisant varier la section de l'ouverture, on réduit dans le même sens l'effet thermométrique. Le rapport de réduction étant m, d l'écart de l'aiguille lorsque la face noircie rayonne à travers la petite ouverture, et d' la déviation produite par le

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, XXII, 372; 1848.

métal à travers la grande ouverture, le pouvoir émissif du métal est égal à $\frac{d'}{md}$.

Description.

Le diaphragme à ouvertures graduées est noirci d'un côté et soigneusement poli de l'autre : c'est la face polie qui regarde la pile. Un écran à double paroi protège ce diaphragme, qui doit être placé à égale distance de la source et de la pile. On recouvre le cube d'une épaisse couche de noir en l'exposant à la fumée d'une lampe à alcool mêlé d'essence de térébenthine; pour faire acquérir à cet enduit un état constant, il faut le maintenir quelque temps à la température de l'expérience. Une couche de noir au vernis a un pouvoir émissif sensiblement moindre. Les lames métalliques s'appliquent par pression ou par des enduits sur les faces du cube : pourvu que l'adhérence soit parfaite, la nature de l'enduit n'exerce aucune influence sur les résultats.

« Sous l'action du rayonnement d'une source à température constante, nous n'avons jamais vu l'aiguille prendre une position d'équilibre stable, dit M. Desains (1). Après le second maximum, qui a lieu autour de quatre-vingt-dix-huit secondes, et qui persiste trente secondes, quarante secondes ou cinquante secondes, selon les cas, l'aiguille se remet en marche; et si, comme cela nous est arrivé, on maintient les circonstances identiques pendant cinq ou six minutes, on observe un second minimum, un troisième maximum et d'autres alternatives. » Ces perturbations tiennent à des causes multiples dont l'analyse est fort délicate; mais il est évident que la couche d'air qui s'échauffe au contact du cube exerce une très grande influence. Il faut donc placer la pile le plus loin possible de la source; dans les expériences de MM. de la Provostaye et Desains, l'intervalle était d'au moins $0^m,300$; pour accroître les déviations, qui eussent été très faibles, on armait la pile de son réflecteur conique.

C'est par expérience qu'on détermine la proportion dans la-

(1) *Loc. cit.*, p. 379.

e est réduite la déviation du galvanomètre lorsque l'on itue à la grande ouverture du diaphragme une autre plus e; on pourra avoir une valeur comprise entre 7 et 8.

Manuel opératoire.

On mesure l'effet thermique de la face noircie du cube à rs l'ouverture étroite.

La même mesure est effectuée pour la face brillante à rs la grande ouverture;

On répète plusieurs fois ces observations pour en prendre oyenne. L'opérateur aura soin de diriger toujours normant au banc la face du cube, car la moindre inclinaison erait les résultats; de plus, les écrans métalliques, dont ntoure l'appareil de toutes parts, ne devront nullement déplacés au cours de l'expérience.

Résultats.

oici quelques chiffres empruntés au Mémoire de MM. de rovostaye et Desains :

$$m = 7{,}6.$$

Déviation produite par la face noircie à travers la petite ouverture................	31°,4
Déviation produite par l'argent vierge sortant du laminoir..........................	7,25
Pouvoir émissif $= \dfrac{7{,}25}{31{,}4 . 7{,}6}$..............	0,03

Pouvoirs émissifs.

Platine laminé...........................	0,106
Or en feuilles...........................	0,043
Cuivre en feuilles......................	0,050
Verre..................................	0,90
Céruse, ocre............................	1,00

ai trouvé, pour la fonte polie, un pouvoir égal à 0,403 (1).

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, XV, p. 513; 1878.

XXXVIe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DES POUVOIRS RÉFLECTEURS.

Théorie.

Les formules données par Fresnel et Cauchy comme expression des lois de la réflexion lumineuse sont applicables à la réflexion calorifique; nous le vérifierons plus tard en opérant sur la chaleur polarisée.

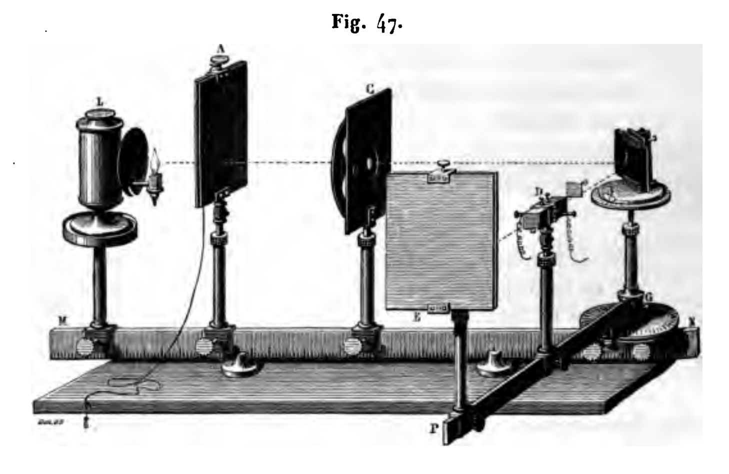
Le but de cette manipulation est simplement d'étudier l'influence de la nature des rayons incidents et de l'inclinaison.

Le pouvoir réflecteur absolu d'un corps pour une radiation donnée de nature, d'intensité et de direction est le rapport qui existe entre la portion réfléchie et la quantité de chaleur incidente totale.

Description.

L'appareil de Melloni se prête fort commodément à la dé-

Fig. 47.



termination des pouvoirs réflecteurs : il suffit de fixer à l'extrémité du banc (*fig.* 47) une colonne G surmontée d'un

ate-forme F sur laquelle on installe le miroir dans une monre spéciale à pivot. Une règle, mobile autour de l'axe de la lonne, porte la pile; la mesure des angles d'incidence et de flexion se fait sur les limbes divisés F et G.

Manuel opératoire.

1° La règle mobile étant amenée dans le prolongement de 'axe du banc, on mesure l'intensité du faisceau transmis directement. La déviation de l'aiguille ne doit pas dépasser 30° à 35°.

2° Disposant alors le miroir sur la plate-forme sous un angle déterminé, l'expérimentateur fait tourner la règle mobile de manière que la pile reçoive le faisceau réfléchi. Le chemin parcouru par les rayons conserve évidemment la même longueur.

Pour éliminer l'erreur qui peut provenir d'un défaut de constance de la source et augmenter la rigueur de l'observation, il est nécessaire de répéter trois fois la mesure de la chaleur transmise et deux fois celle de la chaleur réfléchie, en croisant les épreuves; on admettra le chiffre des dixièmes dans la moyenne des résultats.

Résultats.

Les pouvoirs réflecteurs varient avec la thermochrose de la radiation. Voici, d'après MM. de la Provostaye et Desains, quelques valeurs obtenues sous une incidence de 50° :

	Lampe de Locatelli.	Soleil.
Argent	0,97	0,92
Or	0,96	0,87
Laiton	0,93	»
Acier	0,83	0,60
Verre	0,12	»

Le pouvoir réflecteur diminue lorsque la température de la source s'élève ou lorsque, par l'action d'un milieu, on abaisse

la proportion des radiations infra-rouges. Pour un faisceau homogène, le pouvoir décroît à mesure que la longueur d'onde diminue.

Les proportions de chaleur réfléchie croissent en général avec l'incidence; toutefois, elles passent par un minimum pour l'acier et le métal des miroirs, vers 75° et 72°; ce minimum n'est pas appréciable pour l'argent et le platine.

La perfection du poli contribue à augmenter la quantité totale des radiations réfléchies, mais l'intensité relative des diverses régions du spectre ne dépend que de la substance réfléchissante. M. de Chardonnet a démontré l'exactitude rigoureuse de cette loi : le même physicien a constaté que le pouvoir réflecteur d'un liquide est indépendant des substances qu'il tient en dissolution ou en suspension ([1]).

XXXVII° MANIPULATION.

VÉRIFICATION DE LA LOI DE MALUS EN CHALEUR POLARISÉE.

Théorie.

Quand un rayon polarisé, d'intensité I, tombe normalement sur un analyseur de spath, il se bifurque en deux autres, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire : l'intensité O du premier varie proportionnellement au carré du cosinus de l'angle α que la section principale du cristal fait avec le plan de polarisation du rayon incident; l'intensité du second E est proportionnelle au carré du sinus du même angle.

$$O = I\cos^2\alpha,$$
$$E = I\sin^2\alpha.$$
$$O + E = I.$$

([1]) *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 4 septembre 1882.

De nombreuses vérifications faites par des procédés très différents ont établi en lumière l'exactitude de cette loi, formulée par Malus; mais aucun photomètre n'a la sensibilité ni la précision du thermomultiplicateur. MM. de la Provostaye et Desains s'en sont servis de la manière la plus heureuse ([1]) pour démontrer que cette loi est aussi d'une rigueur absolue en chaleur polarisée.

Description.

Ces savants physiciens ont choisi pour source de chaleur le Soleil et, pour appareil polariseur et analyseur, deux prismes de spath achromatisés. Les faisceaux émergents sont dès lors composés de rayons parallèles, et on peut les prendre fort étroits à cause de leur grande intensité : il en résulte beaucoup de sûreté dans l'orientation et dans l'appréciation des angles; de plus, chacun des faisceaux est complètement polarisé dans un plan variable à volonté et de direction connue.

L'emploi des rayons solaires permet de placer la pile à une distance suffisamment grande pour éviter toute action directe du spath; une longue discussion survenue entre Forbes et Melloni a démontré en effet que les sources artificielles doivent être établies fort près de l'appareil biréfringent et de la pile; or, dans ces conditions, les spaths s'échauffent rapidement et rayonnent assez de chaleur pour troubler tous les résultats. MM. de la Provostaye et Desains employaient des spaths d'au moins $0^m,020$ d'épaisseur, disposés à $0^m,600$ de la pile.

L'image extraordinaire formée par le premier prisme était arrêtée par un écran et l'image ordinaire seule atteignait le second prisme.

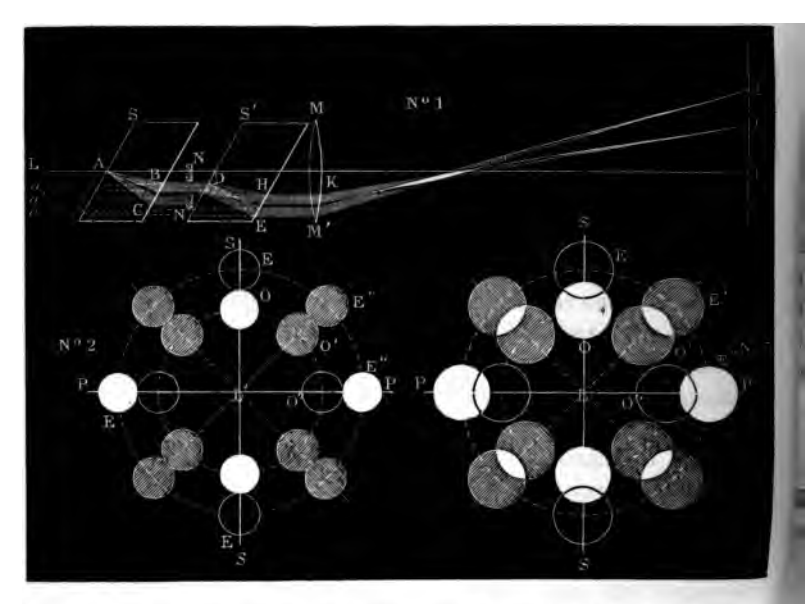
La méthode nécessite évidemment que l'intensité du Soleil reste constante pendant toute la durée des observations comparatives, ou du moins qu'elle ne varie que d'une manière lente et régulière. Ces expériences exigent donc un ciel découvert et une atmosphère pure; en outre, il faut avoir soin

([1]) *Annales de Chimie et de Physique*, 3[e] série, t. XXVII, p. 109; 1849.

de croiser les observations et de les répéter un grand nombre de fois.

Le rayon incident doit être naturel; or on sait que la réflexion sur le miroir d'un héliostat polarise partiellement la lumière : il en est de même pour la chaleur. Pour dépolariser le faisceau, on place donc en avant du polariseur une lame biréfringente, assez mince pour ne pas le séparer, et on l'oriente convenablement.

Fig. 48.



La section principale du polariseur doit être fixe; on la dispose verticalement.

L'image ordinaire qui rencontre l'analyseur donne deux images O' et E' (*fig.* 48), situées dans la section principale de ce cristal; en faisant tourner cet analyseur, on obtient la série des intensités relatives représentées par les nos 2 ou 3.

Les deux spaths pourraient être remplacés sans difficulté par des prismes de Nicol.

Manuel opératoire.

1° Les rayons solaires réfléchis horizontalement par l'héliostat sont reçus à travers une lame de spath mince et dirigés sur le polariseur. On doit s'assurer de la dépolarisation du rayon incident en faisant tourner le polariseur; les deux faisceaux transmis garderont une intensité constante.

2° Les sections principales du polariseur et de l'analyseur étant placées verticalement, on reçoit l'image ordinaire sur la pile et l'on prend pour unité l'effet produit dans ces conditions.

3° On fait tourner l'analyseur de manière à former un angle de 30° vers la droite avec le plan vertical; on le ramène dans sa position primitive; puis on forme le même angle de 30° vers la gauche et l'on revient encore à la position primitive. En répétant cette opération et en notant chaque fois la déviation du rhéomètre, on obtient un certain nombre de valeurs dont on prend la moyenne.

4° La même opération est effectuée pour des angles de 35°, 45° et 52°.

Résultats.

MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé les valeurs suivantes, exprimées en fonction de l'intensité de l'image correspondant au parallélisme des spaths.

0°	1,00
30	0,75
35	0,67
45	0,50
52	0,38

Ces nombres sont précisément les cosinus carrés des angles inscrits dans la première colonne.

Voici les observations qui ont conduit aux deux premières valeurs :

Déviation à 30°.		Déviation à 35°.	
$\alpha =$ 0	22,1	$\alpha = +35$	14,3
+30	16,7	0	20,9
0	22,5	—35	14,5
—30	16,8	0	22,0
0	22,4		

XXXVIIIe MANIPULATION.

EMPLOI DES COUPLES THERMO-ÉLECTRIQUES POUR LA MESURE DES TEMPÉRATURES.

Théorie.

L'emploi des couples thermo-électriques présente dans beaucoup de circonstances de grands avantages sur les procédés thermométriques ordinaires, notamment lorsqu'il s'agit de déterminer de faibles différences de température dans des espaces très rétrécis. Avec un couple convenablement choisi et un galvanomètre très sensible, un excès de 1° peut correspondre à une déviation de dix à quinze divisions du cercle gradué.

Par malheur, il existe une telle instabilité dans les états moléculaires qui déterminent les courants thermo-électriques, que l'on n'est jamais sûr d'obtenir un courant d'une intensité constante quand on met à plusieurs reprises les deux soudures aux mêmes températures. Il en résulte que la courbe de graduation des indications du rhéomètre en fonction des différences de température des soudures doit être vérifiée et refaite fréquemment ([1]).

Cet inconvénient a amené les physiciens à renoncer à l'emploi des couples thermo-électriques : les physiologistes en ont tiré cependant un excellent parti, et il semble qu'en

([1]) *Mémoires de l'Académie royale des Sciences*, t. XXI, p. 240; 1847.

nant compte de quelques observations de M. Rossetti [1], on uisse recourir souvent à ce procédé de mesure des températures.

Description.

Aucune combinaison métallique ne donne lieu à un courant plus intense que le bismuth et l'antimoine, mais la nécessité de former des points de contact d'étendue très limitée entre les deux métaux et d'éloigner les soudures le plus possible des rhéophores ne permet guère l'emploi de métaux aussi cassants, qu'on ne peut étirer en fils. M. Rossetti a donné la préférence aux trois couples fer-cuivre, fer-packfong et acier-packfong; le couple fer-platine fournit aussi de bons résultats.

Il est indispensable que les soudures aient la plus faible masse possible. La forme des aiguilles peut être extrêmement variée, suivant le but qu'on se propose; mais on doit toujours chercher à rendre l'appareil thermo-électrique symétrique dans toutes ses parties.

Les modèles les plus répandus sont ceux de Becquerel et de Dutrochet, représentés ci-contre (*fig.* 49). Les serre-fils sont de la même substance que les éléments du couple et les conducteurs; on emploie la disposition de la *fig.* 50 pour relier le galvanomètre G aux deux soudures. Deux fils de cuivre réunissent les bornes de l'instrument aux serre-fils de cuivre, un fil de fer ferme le circuit entre les deux éléments fer : A étant la soudure exploratrice, B sera maintenu à une température constante.

Le type représenté par la *fig.* 51 est très commode en certains cas. Les deux fils hétérogènes SA et SB sont soudés l'un à l'autre en S; leurs extrémités A et B sont reliées d'autre part à deux fils de cuivre AC et BD, de très grande longueur, destinés à être rattachés aux bornes du rhéomètre. Les joints A et B constituent la seconde soudure de l'instrument, en vertu de la théorie de la chaîne thermo-électrique; pour les tenir à

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4[e] série, t. XIII, p. 68; 1868.

une température constante et bien connue, on les renferme

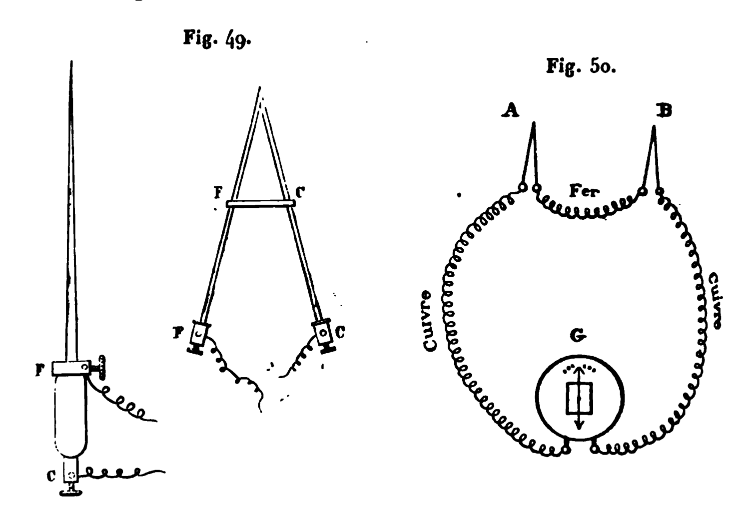


Fig. 49.
Fig. 50.

dans un tube de verre rempli d'alcool ou d'huile de pétrole, qui enveloppe le réservoir d'un thermomètre sensible. Ce tube est entouré, ainsi que les fils, d'une gaine EFGH isolante au double point de vue thermique et électrique.

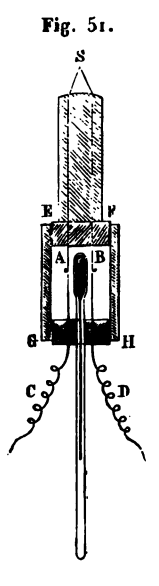


Fig. 51.

M. Rossetti a reconnu la nécessité d'introduire entre le galvanomètre et le couple un commutateur qui permette de faire traverser le fil du galvanomètre par le courant dirigé successivement suivant les deux directions, de sorte que l'aiguille dévie tour à tour à droite et à gauche du zéro. On prend à chaque détermination la moyenne arithmétique des deux lectures. Cette simple disposition introduit une grande précision dans les mesures et elle supprime les irrégularités qui avaient désespéré Regnault.

Avec un galvanomètre médiocrement sensible, une division représente un dixième de degré dans le couple fer-packfong et un cinquième dans le couple fer-cuivre; mais l'appareil perd de s

sensibilité à mesure que la température s'élève, parce que les mêmes accroissements de différence de température des deux soudures ne produisent pas des variations proportionnelles dans les courants engendrés; au contraire, ces accroissements diminuent assez rapidement, et dans le pyromètre magnétique de Pouillet la déviation ne dépasse pas cinq divisions pour une différence de 100° des deux soudures de l'élément thermo-électrique.

Pour s'épargner bien des mécomptes, on évitera de toucher avec les doigts les deux bornes du galvanomètre, de crainte qu'au contact du cuivre rouge avec le laiton il ne se produise une force électromotrice par suite d'une différence de température. Les mêmes précautions seront prises pour les fils conducteurs dans la partie qui avoisine les soudures, pour empêcher toute réaction par conductibilité.

M. Gavarret a indiqué la méthode suivante (1) de graduation du galvanomètre :

« L'une des soudures est placée dans un bain d'huile à la température de l'air ambiant, l'autre dans un second bain d'huile, dont la température est un peu supérieure à celle de l'atmosphère et qui se refroidit très lentement. Des thermomètres très sensibles donnent à chaque instant la température de ces deux bains. L'aiguille, d'abord écartée de sa position d'équilibre, rétrograde vers le zéro de la graduation du galvanomètre à mesure que le bain d'huile se refroidit et tend à se mettre en équilibre avec le premier. »

Il reste à noter la moyenne des positions de l'aiguille à droite et à gauche du zéro pour une différence de température déterminée, et à construire la courbe de graduation ou à dresser une Table. Les raisons qui nous avaient fait observer les arcs d'impulsion au lieu des déviations définitives n'existent plus ici, et l'opérateur ne doit relever que les positions fixes de l'aiguille, qui sont du reste atteintes très rapidement.

---

(1) GAVARRET, *De la chaleur produite par les êtres vivants*, p. 37.

Manuel opératoire.

L'une des soudures étant maintenue à une température constante dans un bain liquide, il n'y a qu'à introduire la soudure exploratrice dans le milieu dont on cherche la température et à observer les déviations correspondantes de l'aiguille, en faisant jouer le commutateur. La courbe de graduation ou la Table donnera aussitôt l'excès de température d'une soudure sur l'autre.

Dans la soudure chaude, le courant va du cuivre au fer.

CHAPITRE VIII.

CALORIMÉTRIE.

XXXIXe MANIPULATION.

URE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES PAR LA MÉTHODE DES MÉLANGES.

Théorie.

rps ayant été chauffé à une température T est plongé calorimètre contenant un poids M d'eau, à une tem- t : le mélange atteint rapidement une température m θ. Représentant par P le poids du corps et par μ le duit en eau du calorimètre et de ses accessoires, on ire

$$PC(T-\theta)=(M+\mu)(\theta-t),$$

$$C=\frac{(M+\mu)(\theta-t)}{P(T-\theta)}.$$

mule est exacte pour un calorimètre contenant plus d'eau, dont la température finale θ s'établit en moins minutes, sans excéder la température de l'air am- plus de 2°; mais il n'est pas toujours possible de se er dans ces conditions : une correction devient dès essaire.

thode classique de compensation de Rumford, la- onsiste à commencer l'expérience avec un calorimètre nt une température qui soit inférieure à la tempéra-

ture ambiante d'une quantité égale à celle dont il doit la dépasser à la fin de l'expérience, est encore employée par plusieurs physiciens; mais elle est illusoire, parce que les périodes de réchauffement et de refroidissement ne présentent pas la même durée. On serait plus près de la vérité si l'on prenait la différence au-dessous de la température ambiante égale aux deux tiers de la différence ($\theta - t$).

Modifié de la sorte, le procédé de Rumford est recommandable en bien des cas, parce que le mieux est assurément de supprimer les corrections en les rendant inutiles.

Ce n'est donc que pour les opérations très délicates qu'il convient de recourir aux corrections méthodiques. Or deux systèmes peuvent être employés, celui de M. Berthelot et celui de Regnault, publié par M. Pfaundler : le premier est sans contredit le plus rigoureux; le second est le plus simple et partant le plus pratique. Je pense que ce dernier doit être préféré dans les laboratoires d'enseignement [1].

Il a un point commun avec celui de M. Berthelot : il ne suppose pas la connaissance de la température ambiante. Comment pourrait-on d'ailleurs déterminer rigoureusement cette température ? Peut-elle même être absolument définie, alors qu'elle varie dans les diverses régions les plus voisines de l'instrument ? Le procédé Regnault-Pfaundler tient compte de son influence, mais sans que l'opérateur soit obligé de la déterminer, et c'est un immense avantage; il exige seulement qu'on relève la température du calorimètre à des époques très rapprochées, depuis environ trois minutes avant le mélange jusqu'à trois minutes après l'établissement du maximum de température, soit pendant dix minutes au plus.

L'essai comprend trois périodes: pendant la première, le calorimètre ne subit que l'influence du milieu ambiant; la température, choisie inférieure d'un degré environ à celle de l'air, s'élève lentement.

---

[1] Le lecteur trouvera tous les éléments d'une discussion approfondie dans les ouvrages suivants : *Journal de Physique*, II, p. 345 (1873); X, p. 46 et 8[illegible] (1881); *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, XI, p. 948 (1867), e[t] *Lehrbuch der Experimental Physik* von Wüllner, II, p. 398.

La période moyenne commence avec l'introduction du corps dans le calorimètre et finit avec la température maximum, au moment où les différences entre deux lectures consécutives sont devenues constantes.

La période finale comprend de cinq à dix intervalles pendant lesquels on observe le refroidissement du mélange.

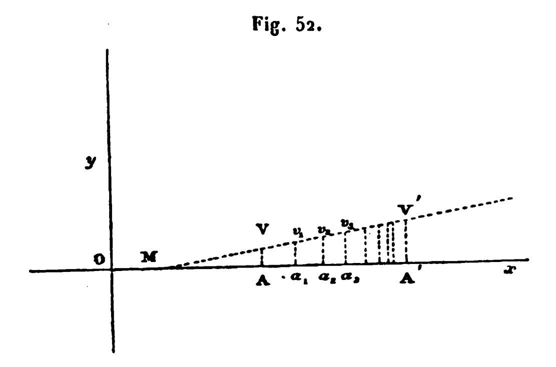
Soient t la température moyenne de la période initiale, et v la perte moyenne par intervalle de vingt secondes pendant cette période. Appelons θ_0 la température au commencement de la deuxième période et $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \ldots, \theta_n$ les températures à la fin du premier, du deuxième, du troisième et dernier in tervalle de cette période. Les températures moyennes de ces intervalles successifs seront $T_1, T_2, T_3, \ldots, T_n$ et nous aurons

$$T_1 = \frac{\theta_0 + \theta_1}{2}, \quad T_2 = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \quad T_n = \frac{\theta_{n-1} + \theta_n}{2}.$$

Enfin désignons par t' et v' les températures et les pertes moyennes de la période finale, et représentons par A le terme de correction ; $(\theta_n + A)$ sera le véritable maximum, c'est-à-dire la température finale qui se serait produite si les influences extérieures avaient été nulles.

Une construction graphique facilite beaucoup le calcul de ce terme. On porte en abscisse (*fig.* 52) une longueur OA

Fig. 52.



égale à la température t de la période initiale, et en ordonnée la longueur AV égale à la perte moyenne v correspondante dans un intervalle.

On fait de même

$$OA' = t' \quad \text{et} \quad A'V' = v',$$

et l'on joint VV' par une ligne droite. On admet que, p chaque température de la période moyenne représentée l'une des abscisses a_1, a_2,..., la perte soit exprimée par l'or née correspondante. Prenant donc les longueurs Oa_1, (Oa_3 égales à T_1, T_2, T_3, ..., on n'a qu'à sommer les ordon pour connaître A.

On peut aussi évaluer cette somme par la formule équ lente

$$A = nv + \frac{v' - v}{t' - t}\left(\sum_{n-1}^{1} \theta + \frac{\theta_0 + \theta_n}{2} - nt\right);$$

le signe $\sum_{n-1}^{1} \theta$ est le symbole de la somme $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \ldots +$ (

La formule exacte de l'opération est donc

$$C = \frac{(M + \mu)(\theta_n - \theta_0 + A)}{P(T - \theta_0)}.$$

La proportionnalité sur laquelle repose ce procédé ne sa être prouvée; elle n'est même pas rigoureusement ex: mais le résultat final est bon. On pourrait le contester le seul cas où A prendrait une valeur notable : or cette é tualité ne doit pas être acceptée pour d'autres motifs.

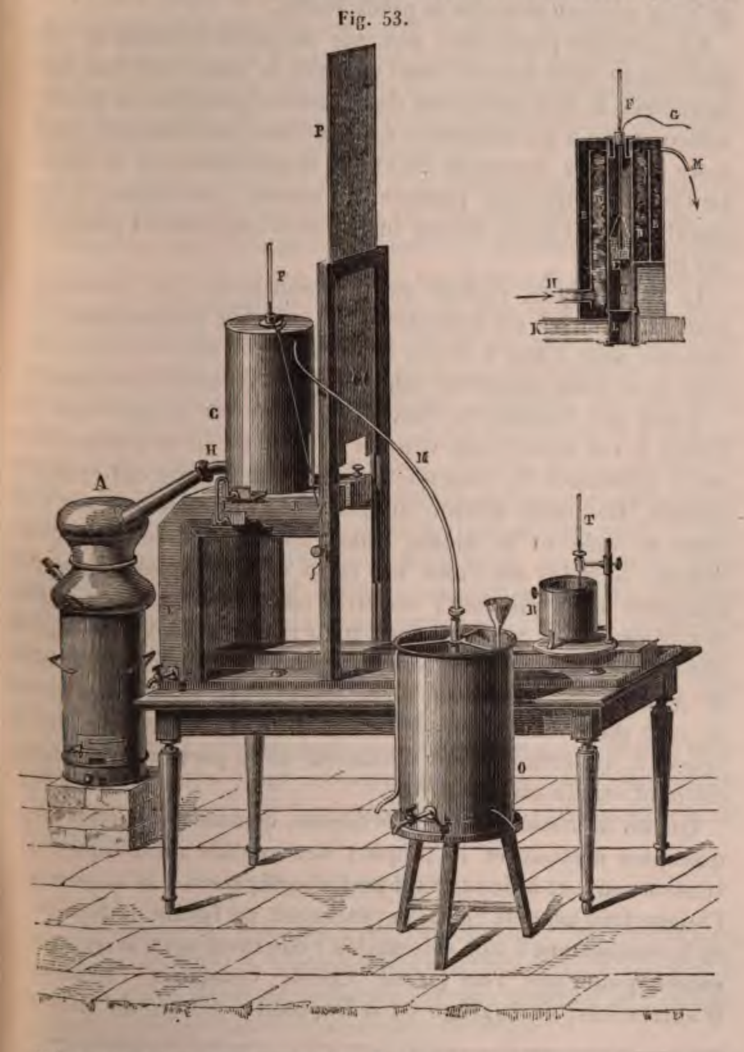
L'exactitude et la sensibilité du thermomètre sont les v tables limites de la précision que l'on peut atteindre dan déterminations des chaleurs spécifiques. La correction aux variations de la chaleur spécifique de l'eau est abs ment négligeable, aussi bien que celle qui est relative à vaporation du liquide, pourvu toutefois que la températur calorimètre ne dépasse pas 15°.

Description.

L'appareil classique est celui de Regnault (*fig.* 53). L'étu se compose de trois enveloppes concentriques en laiton courant de vapeur circule dans l'espace annulaire, tandis le corps soumis à l'expérience est suspendu dans le cyli

du milieu. Un registre à ressort L forme la base inférieure de ce cylindre. La substance est placée en fragments plus ou

Fig. 53.



moins gros dans une corbeille E de fils de laiton très minces dont le poids ne forme jamais qu'une petite fraction de celui du corps : on peut obtenir ces corbeilles aussi légères que

l'on veut en les faisant fabriquer avec un tissu métalliqu quelconque et en les laissant dans l'acide nitrique jusqu'à c qu'elles n'aient plus que le poids voulu.

La corbeille porte dans son axe un petit cylindre de toil métallique dans lequel vient se loger le réservoir d'un the momètre. Il faut au moins deux heures pour que ce thermo mètre arrive à un maximum sensiblement stationnaire, lequ reste toujours inférieur de 2° à la température de la vapeu Le thermomètre doit marquer au moins $\frac{1}{20}$ de degré (1); Re gnault relevait le $\frac{1}{100}$ sur un instrument construit et gradué d ses mains.

Le calorimètre, mobile sur un chemin de fer horizontal peut être poussé en dessous de l'étuve. Un thermomètre es soutenu dans l'eau à $0^m,01$ de la paroi; il doit être très sen sible et ne peut guère être observé qu'avec l'aide d'une lunette

L'eau qui remplit le vase réfrigérant est jaugée dans u flacon à col étroit; son volume est tel qu'après l'immersio de la substance le calorimètre soit à peu près entièremen rempli. Regnault affirme que, le flacon mesureur étant vid dans le vase et le même nombre de secousses lui étan donné, le poids de l'eau ne varie que de quelques centi grammes dans plusieurs mesures consécutives. Pour passe des volumes aux poids, il faut tenir compte des variations d densité de l'eau avec la température et recourir aux Table M. Alluard préférait peser directement l'eau en tarant d'abo le vase plein et rétablissant l'équilibre après l'avoir vidé : c procédé, qui exige moins d'habileté de la part de l'opérateu est peut être le meilleur (2).

Quand la matière est pulvérulente, comme cela arrive po quelques métaux et la plupart des oxydes métalliques, c réussit souvent à donner un peu d'agrégation à la matière e l'humectant avec de l'eau, la pétrissant en forme de boulett et la soumettant à une calcination : elle reste ainsi assez aggl mérée pour que l'on puisse opérer comme à l'ordinair D'autres fois, on l'agrège en la frappant à coups de marte

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, LXXIII, p. 20 (184 3e série, XLVI, p. 257 (1856).

(2) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, LVII, p. 451; 1859.

dans un cylindre semblable à celui dont on se servait autrefois pour forger le platine.

On peut employer l'essence de térébenthine pour déterminer la chaleur spécifique des corps dont on ne possède que de petites quantités. La chaleur spécifique de l'essence étant les $\frac{42}{100}$ de celle de l'eau, l'élévation de température produite par la même quantité de matière est presque deux fois et demie plus forte que sur un même poids d'eau.

Pour réduire en eau le poids d'un calorimètre de laiton, on multiplie son poids, déterminé au centigramme près, par le nombre 0,09391. Pour le thermomètre et la corbeille, il est plus sûr de faire une épreuve directe, car Regnault a constaté que les valeurs calculées sont toujours un peu fortes. Ainsi, pour une corbeille pesant $12^{gr},215$, la valeur en eau calculée était 1,147, alors que la moyenne de plusieurs expériences concordantes ne dépassait pas 0,913. Cette différence est due sans doute aux pertes de chaleur éprouvées par ce tissu à grande surface au moment de l'immersion. Pour le thermomètre, on opère le plus souvent de la manière suivante : après avoir chauffé à 100°, par exemple, dans un bain de mercure, la portion destinée à être immergée dans l'eau, on le porte dans un petit calorimètre ; il suffit de multiplier le poids de l'eau par son accroissement de température et de diviser ce produit par la diminution de température marquée par le thermomètre lui-même pour connaître sa valeur en eau. Elle doit être faible ; le thermomètre de Regnault valait 0,516.

M. Pfaundler dispose dans son laboratoire une pendule frappant de vingt en vingt secondes pour faciliter l'observation des temps et donner à l'opérateur une plus grande liberté de ses mouvements.

Manuel opératoire.

1° La corbeille chargée avec la substance est suspendue au milieu de l'étuve. L'échauffement extrêmement lent que la matière subit dans cet appareil est une garantie de l'exactitude de la température stationnaire observée.

2° Pendant ce temps, le calorimètre est éloigné de l'étuve et masqué par les écrans. On le remplit d'eau ayant séjourné longtemps dans une salle voisine à une température légère-

ment inférieure à celle du laboratoire. Quelques minutes avant de commencer les opérations, on met la pendule en marche et on note la température au commencement et à la fin de dix intervalles de vingt secondes. Un instant avant le dixième signal, on lève les écrans.

3° L'opérateur tire le registre et fait descendre doucement la corbeille dans l'eau. Aussitôt il la décroche et ramène le chariot devant la lunette ; un aide agite continuellement l'eau pendant qu'il suit la marche du thermomètre.

4° Les températures sont notées de vingt en vingt secondes jusqu'au maximum : il suffit généralement de deux minutes pour l'atteindre.

On continue les lectures : les différences étant devenues égales, on poursuit encore pendant deux ou trois minutes.

Résultats.

Je crois nécessaire d'emprunter au Mémoire de M. Pfaundler les chiffres relatifs à une expérience faite sur une substance assez peu conductrice. Le thermomètre employé portait une graduation arbitraire dont chaque division valait 0°,0858 ; le zéro correspondait à la division 24,70 ; les intervalles avaient une durée de vingt secondes.

	Intervalles.	Températures en divisions du thermomètre.	Calculs.
1re période.	0	162,6	Moment de l'immersion.
	10	$162,9 = \theta_0$	
2e période..	11	185,0	
	12	200,0	
	13	206,1	$t = \frac{162,6 + 162,9}{2} = 162,75.$
	14	209,5	
	15	210,7	$v = \frac{162,6 - 162,9}{10} = -0,03.$
	16	211,3	
	17	211,5	Observation.
	18	211,5	On prend pour θ_n la température 211,4 à partir de laquelle l'abaissement devient régulier.
	19	211,5	
	20	211,5	
	21	211,5	
	22	$211,4 = \theta_n$	

	Intervalles.	Température en divisions du thermomètre.	Calculs.
3[e] période..	23	211,3	
	24	211,2	
	25	211,1	$t' = \frac{211,4 + 210,5}{2} = 210,95.$
	26	211,0	
	27	210,9	$v' = \frac{211,4 - 210,5}{8} = +0,11.$
	28	210,8	
	29	210,6	
	30	210,5	

$\Sigma_{n-1}^{1}\theta$		2280,10
$\frac{\theta_0 + \theta_n}{2}$		187,15
	Somme..........	2467,25
$n = 12$		
$nt =$		1953,00
	Différence........	514,25
Différence multipliée par $v - v' = 0,14$.		
	Produit..........	71,995
Produit divisé par $t' - t = 48,20$.		
	Quotient........	1,49
$nv =$		$-$ 0,36
	Somme..........	1,13 = A

$\theta_n - \theta_0 + A = 211,4 - 162,9 + 1,13 = 49^{\text{div}},63 =$ en degrés C. $4^\circ,25$.

La sommation eût été beaucoup plus rapide si on l'avait effectuée à l'aide de la courbe.

La correction à faire subir à la température finale n'est que de $1,13.0,0858 = 0^\circ,097$; nous en conclurons que ces corrections n'auraient aucun sens si le thermomètre ne marquait pas exactement le $\frac{1}{20}$ de degré, et nous attirons toute l'attention du lecteur sur ce point.

Une expérience de calorimétrie bien conduite suivant les règles que nous venons de rappeler peut donner exactement

le chiffre des millièmes. M. Pfaundler a trouvé par exei les valeurs suivantes pour un échantillon de spath :

0,2063; 0,2057; 0,2057; 0,2055; 0,2053;
0,2055; 0,2060; 0,2057; 0,2058; 0,2060.

Moyenne	0,20575
Somme des carrés des erreurs	0,00000079
Erreur probable	0,0000599

La valeur probable de la chaleur spécifique du spatl donc comprise entre 0,20581 et 0,20569.

Chaleurs spécifiques
(d'après Regnault).

Aluminium	0,20556	Antimoine	0,
Cobalt	0,10696	Étain	0,
Nickel	0,11095	Platine	0,
Fer	0,11379	Or	0,
Zinc	0,09555	Mercure	0,
Cuivre	0,09515	Laiton	0,
Argent	0,05701	Verre	0,
Plomb	0,03140	Essence de térébenthine	0,
Bismuth	0,03084		

XLe MANIPULATION.

MESURE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES PAR LA MÉTHOD DU REFROIDISSEMENT.

Théorie.

Cette méthode permet de déterminer le rapport des leurs spécifiques de deux corps solides ou liquides donn

En les soumettant au refroidissement dans une n enceinte vide, à zéro, sous une même surface rayonnante et

des conditions identiques, les poids et les capacités calorifiques présentant seuls quelque différence, il est facile de démontrer que les temps t et t' mis par les substances à se refroidir d'un même nombre de degrés sont proportionnels aux produits PC et P'C' de leurs poids par leurs capacités calorifiques : on a donc, en appelant k la valeur en eau des accessoires de l'appareil qui partagent l'état thermique de la substance,

$$\frac{PC + k}{P'C' + k} = \frac{t}{t'},$$

d'où

$$C' = \frac{PCt' + k(t' - t)}{P't}.$$

La quantité k peut se déterminer par le calcul direct, en tenant compte du poids de ses éléments, ou bien par une expérience de refroidissement sur deux substances dont les chaleurs spécifiques sont exactement connues.

C'est à ce dernier procédé qu'on donne généralement la préférence; on tire de l'équation ci-dessus

$$k = \frac{PC\,t' - P'C't}{t - t'}.$$

Il est nécessaire de ne pas observer des excès trop rapprochés : le temps t doit correspondre à un abaissement de température d'au moins 25°, sinon les erreurs seraient de l'ordre des grandeurs relevées.

Description.

Le petit vase dans lequel Regnault [1] plaçait les substances pulvérisées était en argent d'un très beau poli : c'était un cylindre de $0^m,025$ de hauteur sur $0^m,015$ de diamètre. On a conservé cette forme, qui permet de tasser à volonté la poudre autour du réservoir du thermomètre disposé au centre du cylindre (*fig.* 54).

La base inférieure de ce dé métallique est amovible : après

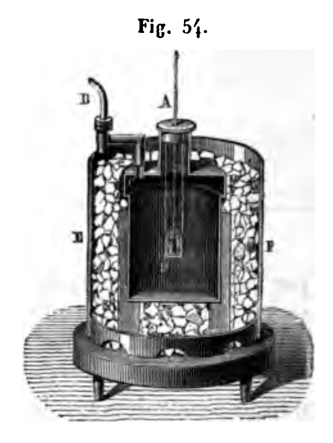
---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3[e] série, t. IX, p. 327; 1843.

avoir introduit la poudre, on replace le fond de manière qu'il s'applique exactement sur la surface aplanie de la matière pulvérulente.

L'enceinte dans laquelle s'observe le refroidissement se compose d'un vase cylindrique de laiton, noirci intérieurement au noir de fumée mat; on y fait le vide par le tuyau BC. On le porte d'abord dans un bain d'eau chaude pour amener le thermomètre à la température voulue; puis on l'entoure de glace concassée pour opérer à zéro.

Fig. 54.



Le refroidissement est suivi avec le plus grand soin à l'aide d'un chronomètre.

MM. de la Provostaye et Desains déclarent dans leur Mémoire sur le rayonnement de la chaleur avoir fait usage de bonnes montres à secondes dont la marche était régulièrement suivie. Toutefois un compteur à pointage donnant le $\frac{1}{5}$ de seconde est d'un emploi plus facile : il suffit de pousser un bouton pour que l'instant précis qu'il s'agit de relever soit marqué par un point sur le cadran.

Mais on est exposé à des confusions fâcheuses lorsqu'on doit faire une série d'observations successives; de plus, on ne peut garder le diagramme de l'observation, attendu qu'il faut effacer les points imprimés à l'encre grasse sur le cadran. Pour éviter ce double inconvénient, j'ai employé, dans mes expériences sur le pouvoir refroidissant des gaz comprimés et des vapeurs ([1]), un dispositif nouveau qui m'a donné de fort bons résultats et convient parfaitement à l'observation des variations d'un thermomètre : il nécessite un télégraphe Morse et un pendule interrupteur.

Placé à 2^m des appareils, je suis la marche du mercure à l'aide d'une lunette; le manipulateur est disposé sous ma

([1]) *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. XVIII, p. 208 (1879), et t. XXIII, p. 315 (1880).

main. Au moment où le mercure passe à un trait déterminé du thermomètre, j'appuie sur la poignée, et un point marque sur le papier du récepteur le moment précis du passage. En même temps un pendule interrupteur compris dans le circuit du télégraphe trace un point chaque seconde : ces points étant distants d'au moins $0^m,020$ et le déroulement du papier étant assez uniforme, je peux mesurer le $\frac{1}{20}$ de seconde; les mesures s'effectuent à partir de l'origine des traits.

Fig. 55.

Il suffit que le thermomètre soit gradué de 5° en 5°.

Pour les liquides, on se sert d'un petit flacon de verre à col étroit, de 10^{cc} de capacité environ, dans lequel on introduit toujours le même volume de liquide : les densités remplacent dès lors les poids dans la formule donnée ci-dessus.

La *fig.* 55 représente en demi-grandeur le petit vase auquel Regnault donnait la préférence : la partie supérieure du tube est mastiquée dans le bouchon métallique de l'enceinte; le liquide doit affleurer en *m* à une température déterminée au commencement de l'expérience.

L'expérience du refroidissement se fait comme à l'ordinaire, sans tenir compte de la rentrée dans le réservoir du liquide froid qui se trouvait précédemment dans la tige : l'erreur occasionnée par cette circonstance paraissait négligeable à Regnault.

C'est à l'essence de térébenthine qu'il convient de comparer les liquides : à 15°, sa chaleur spécifique est égale à 0,414.

Manuel opératoire.

1° Le thermomètre et son étui étant parfaitement nettoyés et desséchés, on en fait la tare en y adjoignant un poids surnuméraire de 20^{gr}.

2° Le corps à essayer est finement pulvérisé et tassé dans l'étui; on complète l'opération en plaçant le couvercle, puis on essuie l'extérieur de l'étui et on le reporte sur la balance :

le poids de la substance s'obtient par différence avec la rigueur de la double pesée.

3° L'enceinte étant fermée, l'opérateur la plonge dans un bain d'eau à 60°; puis il y fait le vide à plusieurs reprises, en laissant rentrer de l'air desséché sur de la ponce sulfurique, de manière à éviter la présence de la vapeur d'eau. Le thermomètre ayant atteint 50°, il retire l'enceinte du bain et l'entoure de glace fondante : il observe le thermomètre à l'aide d'une lunette horizontale.

4° Au moment où la colonne de mercure se trouve à 35°, il note le temps initial, et marque successivement les instants qui correspondent à 30°, 25°, 20°, 15°, 10° et 5°. Par soustraction, il est facile de déterminer les temps mis à passer de 35° à 20°, de 30° à 15°, de 5° à 10° et de 20° à 5°. Pour relier ces résultats, on construira une courbe en portant les intervalles de temps en abscisse et les températures en ordonnée.

5° La même série d'opérations est répétée sur la substance choisie comme type.

Résultats.

La méthode du refroidissement présente de grands avantages sous le rapport de la généralité de son application, mais elle ne donne pas de résultats suffisamment concordants pour les solides, et Regnault lui-même dut avouer que tous ses efforts étaient restés sans succès : cependant elle devient beaucoup plus rigoureuse quand on opère sur des liquides.

Pour déterminer k, on peut employer du fer et du plomb en limaille, dont les capacités calorifiques sont égales à 0,1138 et 0,0314. Regnault cite les résultats suivants de cette opération préliminaire.

	Poids.	Temps. 20° à 15°.	15° à 10°.	10° à 5°.
Fer......	14gr,551	411″	586″	1029″
Plomb....	21gr,787	203″	292″	509″

Il en résulta trois valeurs de k : 0,2643; 0,2811 et 0,2672; les différences eussent été moindres si Regnault avait observé

le refroidissement de 15° en 15°, comme je l'ai indiqué ci-dessus.

L'argent en limaille fortement tassé présenta une capacité égale à 0,05666, alors que très peu tassé il dépassait 0,08519. Tous les métaux offrirent des divergences semblables.

Le Tableau suivant renferme les résultats obtenus avec quelques liquides : k avait été trouvé égal à 0,145 en opérant sur de l'eau et de l'essence de térébenthine.

	Densités moyennes.			Temps.			Capacité moyenne.
	20° à 15°.	15° à 10°.	10° à 5°.	20° à 15°.	15° à 10°.	10° à 5°.	
Sulf. de carb.	1,2676	1,2750	1,2823	165 s	240 s	428 s	0,2189
Éther.......	0,7185	0,7241	0,7297	201	294	530	0,5177
Alcool......	0,8072	0,8113	0,8150	250	359	639	0,6050

Ces chiffres ne sont pas comparables à ceux que donne la méthode des mélanges entre 20° et 100°, mais on doit attribuer l'écart à la différence notable des températures auxquelles s'effectuent ces diverses opérations.

XLIe MANIPULATION.

MESURE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES PAR LE CALORIMÈTRE A GLACE DE M. BUNSEN.

Théorie.

Le poids de la glace fondue se déduit de la diminution de volume que la fusion lui fait éprouver.

Un gramme de glace à zéro a un volume de $1^{cc},09082$, tandis qu'un gramme d'eau ne cube que $1^{cc},00012$: en admettant avec M. Bunsen que la chaleur latente de fusion de la glace soit égale à 80,03, nous voyons qu'une calorie-gramme absor-

bée par la glace du calorimètre correspond à une différence de volume égale à

$$\frac{1,09082 - 1,00012}{80,03} = 1^{\text{mmc}},133.$$

Désignant donc par p le poids du corps introduit dans le calorimètre et par t sa température, sa chaleur spécifique C sera donnée par la formule

$$C = \frac{1,133\,v}{pt},$$

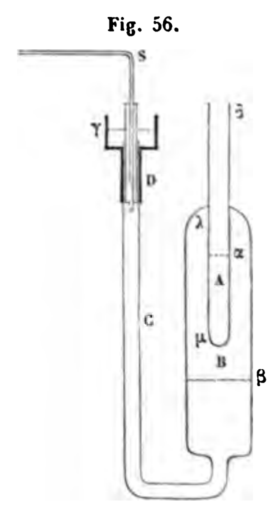
dans laquelle v est exprimé en millimètres cubes.

Le calorimètre de Bunsen porte quelquefois une graduation empirique, analogue à celle du calorimètre Favre et Silbermann que nous aurons à décrire dans la manipulation suivante : nous nous contenterons de signaler le fait.

Description.

L'instrument est représenté *fig.* 56 : il est tout en verre.

Fig. 56.



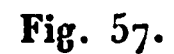
Le tube-laboratoire A contient de l'eau bouillie jusqu'en α; le réservoir B, qui lui est soudé, est rempli, de λ en β, d'eau purgée d'air que l'on a congelée; enfin le bas du réservoir, le tube recourbé C et la douille en fer mastiquée à son extrémité renferment du mercure jusqu'en γ. Un tube calibré S, fixé dans un bouchon, fait suite à l'appareil et sert à mesurer les variations de volume de la glace fondue. Tout l'appareil est plongé dans la neige (¹).

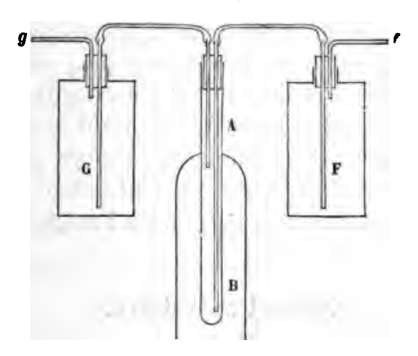
Le remplissage du calorimètre se fait, comme pour un thermomètre, en renversant l'ouverture C non munie de sa douille dans de l'eau chaude et en faisant bouillir un instant celle qui a pénétré dans le réser-

(¹) *Annales de Chimie et de Physique*, 4ᵉ série, XXIII, p. 50 (1871), et *Archives de Genève*, XL, p. 25.

uand l'instrument est refroidi, on y verse du mercure : ce que le niveau atteigne le point β, puis on soutire n siphon l'eau contenue dans le tube C, et l'on achève er les dernières traces d'humidité au moyen du vide courant d'air sec.

former un manchon de glace autour du tube A, on em- n courant d'alcool refroidi à -20° dans un mélange de le neige : le réservoir F (*fig.* 57) renferme l'alcool; le fer-blanc G et le tuyau *g* servent à produire le mouve- u liquide froid par aspiration. En appelant au contraire par F, on ramène l'alcool dans le mélange réfrigérant.


Fig. 57.



ongélation s'opère subitement, mais après un temps ıg. Le manchon doit avoir au moins $0^{m},010$ d'épaisseur; il est formé, on transporte tout l'appareil dans un vase e rempli de neige; puis on fixe la douille D dans un l'on introduit le tube S. On ne tarde pas à voir le mer- avancer dans ce tube et se déverser bientôt à son ex- , ce qui indique une nouvelle formation de glace; elle ientôt si la neige employée est pure, et le niveau du e reste stationnaire. On l'amène à la division voulue en ant plus ou moins le bouchon dans le tube G.

lace généralement au fond du tube A un tampon de entouré d'un fil de platine, pour amortir la chute des t sauvegarder l'appareil contre les chocs.

ube S doit être parfaitement calibré : on mesure le vo-

lume d'une division par une pesée au mercure. Dans le calorimètre qui a servi à M. Bunsen, une division valait $0^{mmc},077$.

Le calorimètre ainsi préparé peut servir à un grand nombre d'opérations, et il est facile de le conserver pendant plusieurs semaines pourvu que, matin et soir, on entretienne l'enveloppe de neige dans son état primitif et normal. C'est par la partie inférieure que disparaît le manchon de glace : cela tient à ce que, l'eau ne dépassant jamais $+4^\circ$, le liquide le plus chaud se trouve au fond du tube A; c'est évidemment une preuve qu'il ne peut se faire aucune perte de chaleur dans cet appareil.

La seule correction que comporte une expérience de calorimétrie est la suivante : le niveau du mercure dans le tube avance ou recule de deux ou trois divisions par heure, alors même que l'instrument ne fonctionne pas; on évalue ce déplacement par deux observations, l'une antérieure, l'autre consécutive à l'expérience, et l'on en tient compte en l'ajoutant ou la retranchant de l'amplitude totale du mouvement.

A chaque nouvelle expérience il faut enfoncer un peu plus le bouchon, pour ramener le mercure à l'origine de la graduation.

Manuel opératoire.

Le poids p du corps ne doit guère dépasser 3^{gr} à 4^{gr}; le tube reçoit généralement 20^{gr} d'eau distillée.

Aucune prescription spéciale ne s'impose à l'opérateur en dehors de celles qui ont été formulées dans les opérations précédentes : il faut employer une petite étuve qui permette de faire tomber directement le corps dans le calorimètre : le tube A doit être bouché.

Résultats.

Les chaleurs spécifiques déterminées par le calorimètre à glace sont toujours inférieures de $\frac{2}{1000}$ à $\frac{3}{1000}$ à celles qu'on obtient par la méthode des mélanges; cette différence doit être attribuée uniquement à ce que, dans l'appareil de M. Bunsen,

les capacités sont prises de 0° à 100°, tandis que dans le calorimètre Regnault on opère de 16° à 100°.

XLIIe MANIPULATION.

MESURE DES CHALEURS SPÉCIFIQUES PAR LE CALORIMÈTRE A MERCURE.

Théorie.

Le nom de *thermomètre à calories* donné au calorimètre à mercure de Favre et de Silbermann fait connaître la nature de ses indications : la chaleur apportée au centre du réservoir dilate le mercure d'une quantité proportionnelle au nombre de calories reçues.

La tige de l'instrument est donc graduée en calories ; on effectue cette graduation de la manière suivante. Un poids connu d'eau M est introduit à une température T_1, et il se refroidit jusqu'à la température θ_1, abandonnant $M(T_1 - \theta_1)^{cal}$ qui font progresser le mercure de n divisions : chacune d'elles vaut donc

$$\frac{M(T_1 - \theta_1)}{n} = a^{cal}.$$

Si l'on introduit dans le moufle de l'instrument un poids P du liquide à étudier à une température T et qu'on le laisse se refroidir jusqu'à θ, le mercure avançant de m^{div}, on peut écrire

$$PC(T - \theta) = ma;$$

d'où on tire la valeur cherchée C.

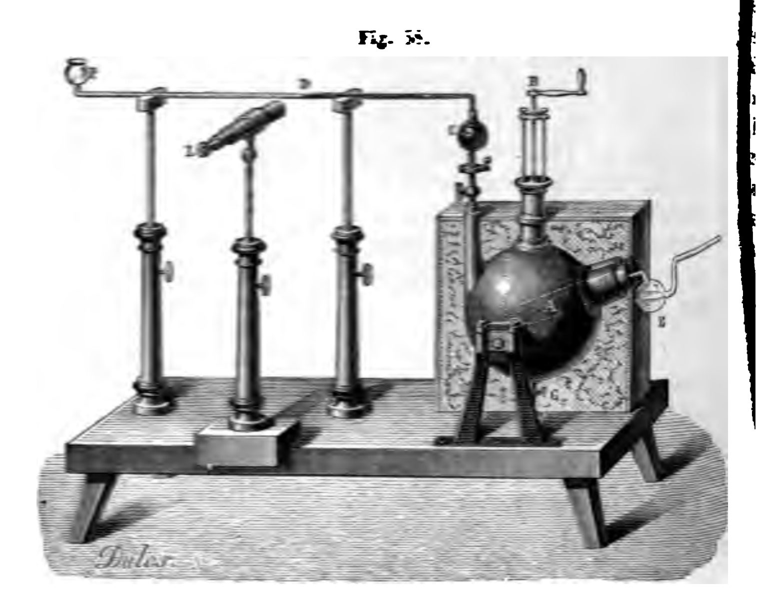
Pour éliminer les influences extérieures étrangères au phénomène qu'on se propose d'observer, il faut suivre la marche de la colonne mercurielle cinq minutes avant et cinq minutes après l'expérience, et en déduire le déplacement moyen par minute au cours même de l'opération.

Cet instrument très simple et très ingénieux est susceptible d'une grande précision. Cependant il présente une cause d'erreur qu'on n'est jamais sûr d'avoir complètement évitée; car il s'agit d'empêcher la chaleur introduite au centre de la boule de se communiquer jusqu'à l'enveloppe et de la dilater, ce qui produirait un effet inverse de celui qui résulte de la dilatation du mercure. On augmente la rigueur de l'opération en employant un calorimètre de masse considérable dans lequel on introduit une petite quantité de chaleur.

Description.

Le calorimètre à mercure se compose essentiellement d'un gros réservoir sphérique de fonte A (*fig.* 58), qui peut conte-

Fig. 58.



nir jusqu'à 260^{kg} de mercure : le modèle des laboratoires d'enseignement n'en renferme d'ordinaire que 25 à 30. Deux ou plusieurs moufles métalliques se prolongent dans l'intérieur de cette sphère : un piston plongeur B permet de faire affleurer au point voulu le mercure dans le tube capillaire D. Une

enveloppe de bois, remplie de duvet, protège le réservoir contre les variations irrégulières de température.

Le liquide soumis à l'expérience est versé dans une éprouvette en verre mince, qui baigne dans le mercure que contiennent les moufles; de la sorte l'équilibre s'établit rapidement entre la température du corps et celle du mercure du réservoir : de petits tourniquets retiennent les éprouvettes en place contre la poussée du mercure.

La graduation de l'instrument se fait à l'aide d'une pipette E, de forme spéciale, dans laquelle on chauffe le liquide destiné à être introduit dans le moufle : il n'y a qu'à la retourner pour effectuer le transvasement. Ce dispositif est avantageux, mais il faut veiller soigneusement à ne pas introduire de vapeur avec le liquide : en employant de l'eau qu'on chauffe vers 100°, il est bien difficile d'éviter cet inconvénient : aussi conseillerons-nous d'opérer de préférence sur du mercure, de faible capacité calorifique il est vrai, mais qu'on peut chauffer à 200° sans aucun inconvénient.

Dans une instruction sur l'emploi du calorimètre à mercure [1], M. Favre a recommandé d'expulser complètement l'air du grand réservoir pendant l'opération du remplissage, afin d'éviter la marche par saccades du mercure dans le tube calorimétrique. Cette condition est facile à réaliser à l'aide d'une disposition spéciale qui permet au mercure, lorsqu'il pénètre en filet très fin dans l'intérieur de l'appareil, de chasser devant lui la totalité de l'air raréfié. Deux robinets G, dont un seul est visible sur la figure, sont fixés à cet effet sur le réservoir de fonte; après avoir fait basculer la boule sur ses tourillons, de manière à amener ces robinets à la partie supérieure, on met l'un d'eux en communication avec une machine pneumatique, tandis qu'on fait arriver le mercure par l'autre, à travers un entonnoir de verre effilé.

Lorsque le réservoir est rempli, on ferme les deux robinets et l'on remet la boule de fonte dans sa position normale; la colonne graduée se fixe enfin sur l'appareil par l'intermédiaire d'un collier à gorge en acier, et on la remplit de mer-

---

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 4° série, XXVI, p. 385 (1872), et *Journal de Physique*, I, p. 332; 1872.

cure à l'aide d'un tube très fin, en veillant à ce qu'il ne s'y introduise aucune bulle d'air.

Le tube calorimétrique doit être parfaitement calibré; son diamètre sera tel que la sensibilité de l'appareil ne devienne pas exagérée. La calorie correspond le plus souvent à $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{10}$ de millimètre; on peut en observer le $\frac{1}{1000}$ à l'aide de la loupe L, qui porte un micromètre.

Toutes les opérations doivent s'exécuter nécessairement dans une salle à température constante, et dans les conditions mêmes où l'on s'est placé pour déterminer la calorie.

Manuel opératoire.

1° L'observateur relève pendant cinq minutes la marche du mercure.

2° Le liquide, pesé avec soin et chauffé à l'étuve, est versé dans le tube que renferme le moufle; on marque de cinq en cinq minutes la position du mercure.

3° Le mercure atteint bientôt une position à peu près stationnaire; on suit pendant cinq minutes les légères variations qu'il présente, d'après une loi régulière, et l'on en déduit la correction.

La température initiale et finale doit être déterminée à moins de $\frac{1}{20}$ de degré et le poids au centigramme.

Quand on veut appliquer ce procédé à la mesure des chaleurs de combinaison, il faut avoir soin de conserver d'abord les corps dans des moufles séparés, afin qu'ils soient l'un et l'autre à la même température initiale, [qui est celle du calorimètre.

Résultats.

M. Favre a donné les résultats complets d'une expérience relative à une réaction simple et presque instantanée, la précipitation d'un sulfate par le chlorure de baryum : elle permet de se rendre exactement compte de la valeur des corrections à effectuer.

Durée en minutes.	Marche du mercure.	Différences.	Moyennes.
	mm		
0	62,405		
5	64,482	2,077	
10	66,561	2,079	2,078
15	68,640	2,079	
20	94,992	26,352	
25	97,454	2,462	
30	99,672	2,218	
35	101,763	2,091	
40	103,672	1,909	1,970
45	105,582	1,910	

La marche moyenne du mercure en cinq minutes a été égale à $\frac{2,078 + 1,970}{2}$, soit $2^{mm},024$; or l'expérience a duré quarante-cinq minutes : le mercure a donc avancé pendant toute l'expérience de $18^{mm},216$ sous les influences étrangères à la réaction ; mais la progression totale a été de

$$105,582 - 62,405 = 43^{mm},177;$$

la marche du mercure, sous l'action seule de la précipitation chimique, a donc été de

$$43,177 - 18,216 = 24^{mm},961.$$

Chaleurs spécifiques des liqueurs à 15°.

Alcool absolu	0,579
Acide sulfurique à 1,84	0,335
Huile d'olive	0,310
Mercure	0,033

C'est à l'aide du calorimètre à mercure que M. Raoult [1], reprenant les travaux déjà anciens de Fabre et Silbermann, a comparé la chaleur chimique et la chaleur voltaïque de la pile; il a démontré que l'égalité admise généralement n'est pas rigoureusement vérifiée par l'expérience, ainsi qu'il ressort des chiffres suivants :

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, IV, p. 406 ; 1865.

Pôle +	Pôle −	Chaleur voltaïque.	Chaleur chimique.
Cu; CuO,SO^3	Fe; FeO,SO^3	14579	19095
Pt; $AzO^5,4HO$	Zn; SO^3 + Aq	40630	43280
Cu; CuO,SO^3	Zn; KO + Aq	32260	30230

Cette expérience très intéressante peut être reproduite sa difficulté en introduisant dans le moufle du calorimètre u éprouvette chargée de 15gr d'eau et traversée par un fil de p tine fin enroulé autour d'un tube.

XLIIIe MANIPULATION.

MESURE DES CHALEURS DE COMBINAISON PAR LE CALORIMÈ DE M. BERTHELOT.

Théorie.

Les méthodes calorimétriques employées par M. Berth lot (1) procèdent de la méthode des mélanges décrite dessus.

Considérons le cas le plus simple, celui de deux liquid exerçant une réaction instantanée et s'élevant de $\Delta\theta$ degr par le mélange direct. Le poids de la combinaison étant P C sa chaleur spécifique, la chaleur dégagée est égale à PC.

M. Berthelot supprime la correction du refroidissement opérant sur 500gr de liquide au moins, dans des conditio telles que l'expérience ne dure pas plus de deux minutes que l'excès de température finale sur celle du milieu ambia ne dépasse pas 2°.

---

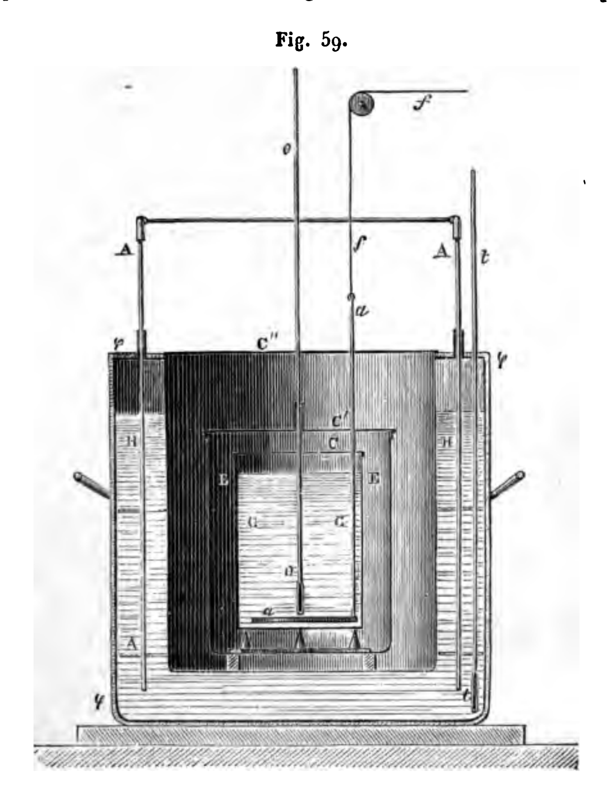
(1) Les détails de cette manipulation sont empruntés à un Mémoire M. Berthelot sur les *Recherches calorimétriques* (*Annales de Chimie et de Pl sique*, 4e série, XXIX, p. 94; 1873).

Les pertes de chaleur sont négligeables dans une expérience dirigée de la sorte.

Description.

Le calorimètre de M. Berthelot (*fig.* 59) est en platine : il est pourvu d'un couvercle C, agrafé à baïonnette sur les bords

Fig. 59.



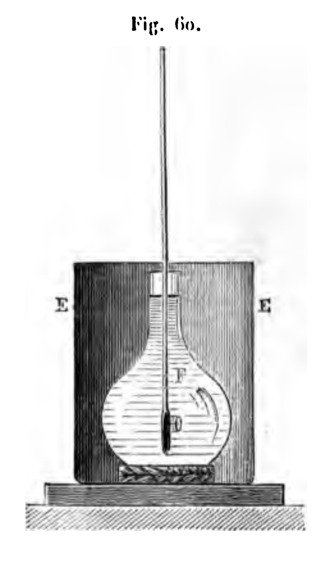
du vase cylindrique G et percé de trous pour le passage de l'agitateur, du thermomètre et des tubes abducteurs destinés aux liquides. Dans les expériences où l'équilibre de température est presque instantané, on peut supprimer le couvercle et l'agitateur *a* et employer le thermomètre lui-même pour remuer le liquide.

Ce calorimètre pèse 63gr sans les accessoires, 97 avec les accessoires; réduit en eau, il vaut 2 à 3gr. M. Berthelot l'enferme dans une enceinte argentée E, placée elle-même dans une enceinte d'eau A revêtue de feutre.

Le calorimètre est posé sur trois pointes de liège, fixées sur un petit triangle de bois; le vase cylindrique de laiton argenté porte lui-même sur de minces rondelles de liège. Un disque de carton recouvert d'étain et percé de trous convenables sert de couvercle à la caisse extérieure.

L'eau doit être placée dans l'enceinte à double paroi plusieurs jours à l'avance, au lieu même qu'elle doit occuper pendant les expériences, afin que tout le système se mette en équilibre régulier avec le milieu ambiant. Le tout est disposé dans une grande chambre, aussi bien abritée que possible contre l'action du Soleil, et dans laquelle on place également à l'avance dans les enceintes métalliques (*fig.* 60) toutes les liqueurs et tous les instruments qui doivent jouer un rôle dans l'expérience, de manière que leur température soit bien uniforme. Les fioles F sont en verre très mince, afin que leurs parois se mettent rapidement en équilibre de température avec le liquide intérieur : le col en est court et le trait de jauge se trouve placé à sa naissance, afin que le liquide soit contenu en totalité dans la panse.

Fig. 60.



Au lieu de peser les liquides, M. Berthelot les jauge dans des fioles, burettes, pipettes ou autres vases de mesure; mais il est indispensable de vérifier soi-même la capacité des unités, par une pesée préalable. A cet effet, on place un flacon sur le plateau de la balance, et, après l'avoir taré, on y fait couler le contenu de la pipette que l'on veut contrôler par exemple. On appuie le bec pour faire écouler la dernière

goutte, on souffle avec la bouche et, le flacon étant bouché, on pèse l'eau qu'il contient. Il suffit de connaître la température et la densité du liquide pour calculer aisément son volume : la perte de poids produite par la poussée de l'air est de $\frac{1}{1000}$ environ. Les divergences entre plusieurs essais consécutifs faits par M. Berthelot ne surpassent pas $0^{gr},01$ pour des pipettes de 50^{cc}. En général, tous les jaugeages peuvent être effectués au millième et souvent au demi-millième près.

Les thermomètres doivent être très sensibles : Baudin en construit d'excellents, qui prennent, en moins de quinze secondes, la température du liquide au sein duquel on les agite : ces instruments embrassent seulement un intervalle de 10 degrés divisés en cinquantièmes. Avec un peu d'habitude on partage aisément à l'œil ces divisions en quatre parties, ce qui fournit le $\frac{1}{200}$ de degré : en observant avec une lunette, on évaluerait le millième.

Manuel opératoire.

1° Les liquides destinés à réagir l'un sur l'autre sont contenus dans de grands flacons, lesquels sont restés dans la même pièce pendant plusieurs jours, à côté l'un de l'autre, sur une table qui ne reçoit jamais directement les rayons du Soleil. On en remplit deux fioles jaugées de 300^{cc}.

2° Le contenu de l'une des fioles est versé dans le calorimètre et l'on y plonge un thermomètre ; la seconde fiole est déposée sur un valet de paille dans l'enceinte métallique représentée par la *fig.* 60. On y introduit un thermomètre et l'on agite vivement. Les températures sont lues à plusieurs reprises et inscrites sur le registre des expériences : elles ne diffèrent généralement que de $\frac{2}{100}$ ou $\frac{3}{100}$ de degré.

3° A l'aide d'une pince en bois, on saisit le col de la fiole et l'on en verse le contenu dans le calorimètre ; il se met en équilibre au bout de vingt secondes et demeure stationnaire pendant deux minutes au moins et souvent davantage. Cette température est notée avec soin.

Résultats.

Prenons pour exemple la recherche de la chaleur dégagée dans la neutralisation de l'acide tartrique par la soude.

Solutions	Soude : 2lit contenant................	31gr, soit 1éq
	Acide tartrique : 2lit contenant.........	75gr, soit 1éq

Ces deux liqueurs sont équivalentes à volumes égaux et se saturent l'une l'autre : opérons sur 300cc de chacune d'elles, soit $\frac{3}{20}$ de la solution préparée.

Température de la soude dans le calorimètre............	20°,48
» de l'acide tartrique dans la fiole...........	21°,48

Après mélange, le maximum est atteint en dix secondes.

Température......................................	24°,105
Densité de la solution de soude......................	1,023
Chaleur spécifique.................................	0,970
Poids des 300cc réduits en eau......................	298gr
Poids du calorimètre et du thermomètre réduits en eau..	5gr,6
Poids total en eau avant le mélange..................	303gr,6
Densité de la solution d'acide tartrique..............	1,017
Chaleur spécifique.................................	0,977
Poids des 300cc réduits en eau......................	298gr,3
Poids total en eau après le mélange..................	601gr,9
Températ. initiale moyenne $\frac{303,6.20,48+298,3.21,48}{601,9}$.	20°,975
Élévation de température $\Delta\theta = 24°,105 - 20°,975$......	3°,130
Chaleur spécifique du tartrate de soude...............	0,98
Chal. dég. $300(1,023+1,017)0,98.3,13+5,6.3,13 =$	1893cal
Pour 31gr de soude $= \frac{1893.20}{3} =$	12620cal

Voici, pour quelques sels, les résultats obtenus par MM. Berthelot et Thomsen :

Bases.	Acides (1 équivalent = 2 litres). HCl.	AzO5,HO.	SO3,HO.
NaO................	13,7	13,7	15,85
KO.................	13,7	13,8	15,70
ZnO................	9,8	9,8	11,7
CuO................	7,5	7,5	9,2
AgO................	»	5,2	7,2

Les trois premières bases étaient dissoutes dans la proportion de $1^{éq}$ pour 2^{lit}; pour l'oxyde d'argent, il n'y avait que $1^{éq}$ pour 25^{lit}. La chaleur dégagée dans la formation des sels métalliques varie notablement avec la concentration.

XLIVe MANIPULATION.

MESURE DES CHALEURS LATENTES DE VAPORISATION.

Théorie.

La quantité de chaleur cédée par un poids P de vapeur, à la température T, se condensant à cette température et se refroidissant de T à θ degrés, dans un calorimètre de masse M, dont la température initiale était t, peut être calculée par la formule

$$P\left[x + C\left(T - \frac{t+\theta}{2}\right)\right] = M(\theta - t),$$

dans laquelle x est la chaleur latente de la vapeur et C la chaleur spécifique du liquide.

Description.

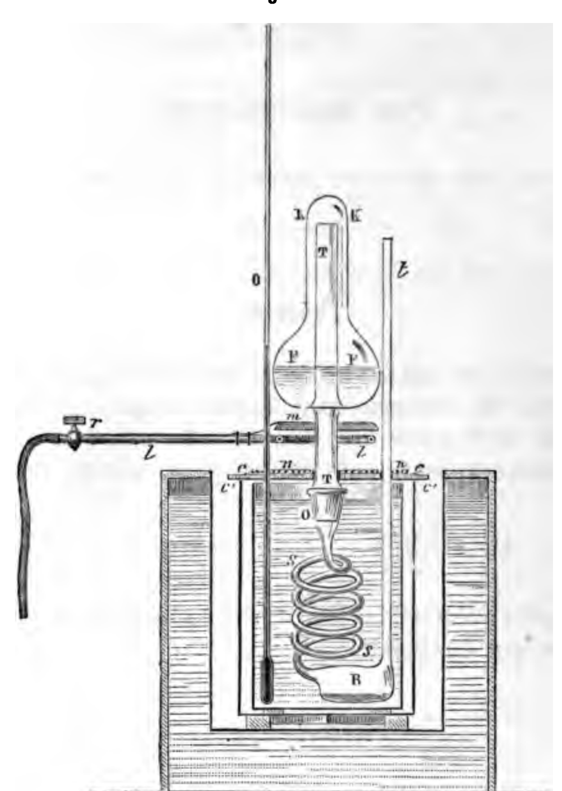
Les premières expériences précises ont été exécutées par Despretz, au moyen d'un appareil dont on trouve la description dans les Traités élémentaires de Physique et qui a été reproduit pour les laboratoires d'enseignement; mais les entraînements d'eau ne peuvent être évités dans cet instrument et les résultats de l'expérience se trouvent affectés d'une erreur considérable.

M. Berthelot a fait construire par M. Alvergniat un appareil nouveau, tout en verre, dans lequel la vapeur maintenue

sèche est précipitée *per descensum* dans un calorimètre bie protégé contre les actions extérieures ([1]).

La *fig.* 61 représente l'instrument prêt à fonctionner. Un

Fig. 61.



fiole de verre F de 100cc environ est traversée par un tub qui descend à $0^m,040$ en dessous et s'ajuste avec un serpenti plongé dans le calorimètre Berthelot. La fiole est chauffée une rampe à gaz circulaire *l*, recouverte d'une toile mét

([1]) *Journal de Physique*, VI, p. 337; 1877.

lique *m*. Une feuille de carton *c* et une lame de bois métallisée *n* protègent le calorimètre contre le rayonnement de la flamme.

On n'opère que sur 20^{gr} ou 30^{gr} de liquide et l'opération ne dure pas plus de quatre minutes; il se produit généralement une élévation de température de 3° à 4° dans l'eau du calorimètre, dont le poids est de 800^{gr} environ.

Manuel opératoire.

1° La fiole est tarée à l'avance, remplie de liquide comme on la voit en F; puis on allume la rampe et l'on observe aussitôt, avant que la distillation soit commencée, la marche du thermomètre pendant trois minutes.

2° On note toutes les vingt secondes les températures du calorimètre : il faut que l'on voie le liquide ruisseler en T.

3° On éteint le feu, on enlève la fiole, on la bouche et on la laisse refroidir.

Pendant ce temps on suit encore au thermomètre le refroidissement de l'eau du calorimètre, jusqu'à ce que l'abaissement soit devenu régulier.

4° On pèse la fiole, ce qui donne par différence le poids d'eau condensée.

Le réchauffement dû à la flamme du gaz est connu par l'observation de la première période; le refroidissement est évalué par les variations de la période consécutive. On en déduit sans peine les pertes ou gains de l'expérience, par la méthode de calcul indiquée ci-dessus; il peut y avoir compensation exacte.

Résultats.

M. Berthelot a trouvé pour la vapeur d'eau

635,2; 637,2 et 636^{cal},2.

Moyenne : 636^{cal},2.
Regnault avait indiqué, entre 0° et 100° : 636^{cal},6.

Voici quelques résultats donnés encore par M. Berthelot :

	cal
Acide azotique monohydraté..............	115,1
» acétique »	120,8
» » anhydre..................	66,7
Chloral anhydre..........................	54,2
Hydrate de chloral.......................	132,3

XLVe MANIPULATION.

MESURE DE LA CHALEUR SPÉCIFIQUE DE L'AIR.

Théorie.

Cette expérience, qui est une des plus délicates de Regnau peut être répétée dans les laboratoires, et elle conduit à c résultats qui sont généralement peu éloignés de ceux de l lustre physicien.

P et T étant le poids et la température du gaz soumis à l'exj rience, x sa chaleur spécifique, M le poids en eau de tout calorimètre, t et θ les températures initiale et finale de l'ea on a

$$Px\left(T - \frac{t+\theta}{2}\right) = M(\theta - t).$$

Les corrections peuvent être effectuées par le procédé Re gnault-Pfaundler, que nous avons appliqué dans les manipu lations précédentes.

Description.

L'air parfaitement sec est renfermé sous une pression d 2^{atm} ou 3^{atm} dans un réservoir de volume V, maintenu à un température constante t_0 dans un bain d'eau : pour calculer

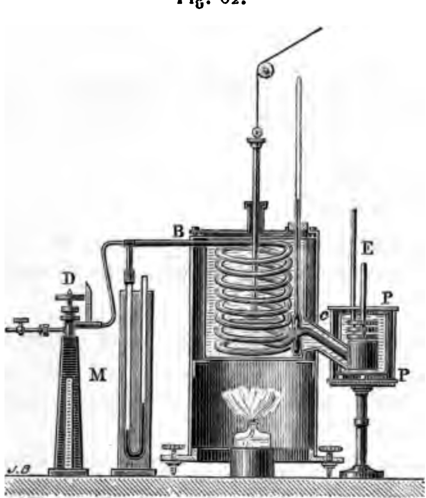
oids P du gaz dépensé pendant l'expérience, il suffit de conaître les pressions initiale et finale H et h, car on a en effet

$$P = V . 1,293 \frac{H-h}{760} \frac{1}{1+at_0}.$$

Regnault employait une formule empirique fondée sur des expériences préalables, mais on peut se contenter d'appliquer la loi de Mariotte quand on opère sur l'air.

La vitesse d'écoulement ne doit pas dépasser 5^{lit} à la minute, ce qui correspond à un excès de pression d'au plus

Fig. 62.



$0^{m},120$ d'eau à l'entrée de l'appareil. Il est facile de rendre cette surcharge constante et uniforme en relevant à la main la vis D (*fig.* 62), à mesure que la pression baisse dans le réservoir. On compense de la sorte la diminution progressive de la vitesse du courant par une augmentation convenable de l'orifice qui lui donne issue.

Le manomètre doit marquer une pression invariable.

Le gaz est chauffé dans le serpentin BC, qui est formé d'un tube d'au moins 6^{m} de long sur $0^{m},008$ de diamètre; on opère

généralement au bain d'huile à une température de 150°; mais, pour éviter l'emploi d'un thermomètre à air, je fais exécuter cette expérience à 100°, dans l'eau bouillante, en tenant compte toutefois de la pression atmosphérique.

Le calorimètre P est formé d'une série de boîtes en laiton, divisées à l'intérieur par des cloisons en spirale, qui font circuler le gaz à travers la masse d'eau réfrigérante : on s'assure, à l'aide d'un thermomètre, qu'il a exactement à sa sortie en E la température de l'eau contenue dans l'appareil.

Je ne crois pas devoir insister davantage sur la description d'un appareil classique, qu'on trouve dans tous les Traités de Physique.

Manuel opératoire.

1° Le réservoir étant rempli d'air sec depuis la veille, on note sa température et sa pression au moment de commencer l'expérience.

2° Le calorimètre reçoit un poids connu d'eau : ses constantes ont été mesurées.

3° L'étuve étant à 100°, on prend au $\frac{1}{20}$ de degré la température du calorimètre et l'on répète cette observation au bout de dix minutes.

4° L'écoulement commence : la main sur le robinet D, un aide maintient la pression constante au manomètre, tandis que l'observateur inscrit de cinq minutes en cinq minutes les températures du calorimètre.

5° L'opération doit durer au moins une demi-heure : au bout de ce temps, on arrête l'écoulement du gaz et l'on continue de relever la température pendant dix minutes; la pression de l'air du réservoir est notée, ainsi que la température du bain, qui a dû rester invariable.

Les deux observations antérieure et consécutive permettent d'évaluer la température moyenne et la perte moyenne de ces périodes, puis de calculer ou de mesurer sur une épure la somme des pertes subies pendant l'opération.

Résultats.

Chaleurs spécifiques à pression constante
(d'après Regnault).

Air	0,23741
Acide carbonique	0,2169
Oxyde de carbone	0,2450
Hydrogène protocarboné	0,5929
» bicarboné	0,4040
Hydrogène	3,4090

XLVI[e] MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA CONDUCTIBILITÉ DANS LES CRISTAUX.

Théorie.

L'appareil d'Ingenhousz permet de mesurer les coefficients de conductibilité des métaux en prenant l'un d'entre eux pour unité; ces coefficients sont dans le rapport des carrés des longueurs sur lesquelles la cire a été fondue.

Une méthode analogue a été appliquée par de Senarmont à l'étude de la conductibilité des cristaux : en opérant sur des lames minces couvertes de cire, de manière que leur conductibilité extérieure fût uniforme, il put déterminer les courbes isothermes relatives à un grand nombre de substances et mesurer leurs conductibilités dans toutes les directions. La théorie exige que l'état permanent soit établi dans cette expérience : on attendra donc que la courbe ait atteint son maximum.

Description.

De Senarmont perçait au milieu des plaques un trou étroit dans lequel il engageait un fil d'argent chauffé par son extrémité.

M. Jannettaz ([1]) a éludé la nécessité de percer les lames en appliquant à leur surface une petite boule de platine de $0^m,001$ à $0^m,002$ de diamètre, à laquelle sont soudés deux fils fins, mis eux-mêmes en communication avec les pôles d'une pile formée de trois éléments Bunsen à section rectangulaire.

M. Jannettaz recouvre les lames, non pas de cire, mais de saindoux fondu et passé à travers un linge fin : on peut y mêler des matières roses ou vertes, de nuances vives. Pour répandre le corps gras sous une couche mince et régulière, il faut chauffer d'abord les lames dans une étuve, d'où on les retire aussitôt qu'elles sont tièdes; puis on y laisse tomber deux ou trois gouttes de graisse fondue. On l'étale à l'aide d'un pinceau et l'on retire l'excès au moyen de papier à filtrer, avec lequel on balaye la surface de la plaque. Lorsque celle-ci n'est pas trop chaude, elle exerce sur la graisse une assez grande adhérence pour que le papier y laisse un enduit uniforme très mince.

Le platine peut être chauffé au rouge sombre, bien que ce soit inutile. L'expérience finie, on lave la plaque au sulfure de carbone ou à l'éther.

M. Röntgen ([2]) avait imaginé une autre méthode, également ingénieuse, de tracer les isothermes. Il couvrait la lame d'un dépôt de vapeur d'eau qui disparaissait sous l'action de la pointe chaude dans un rayon variable : pour rendre manifeste la courbe isotherme limitant la surface devenue sèche, le physicien allemand la saupoudrait de lycopode qui adhère sur le verre aux points où la buée a persisté et dessine les contours de la courbe d'une façon plus nette que le bourrelet qui se forme sur la graisse.

M. Jannettaz disposait ses lames sur un support spécial qui ne se rencontre pas généralement dans les laboratoires : on y suppléera sans peine par l'appareil représenté *fig.* 63; la seule condition essentielle à réaliser est l'horizontalité de la plaque A.

La mesure des axes des isothermes se fait sur la machine à

([1]) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, XXIX, p. 5 (1873), et *Journal de Physique*, V, p. 150 et 247; 1876.

([2]) *Annales de Poggendorff*, CLI.

diviser, à l'aide d'une disposition très heureuse et fort simple, inventée par M. Desains pour l'étude des anneaux colorés. La lame posée sur le chariot de la machine se déplace dans le champ d'une lunette fixe : l'opérateur compte le nombre de tours nécessaires pour amener sous la croisée des fils du viseur les extrémités de la longueur à mesurer.


Fig. 63.



En taillant dans un même cristal des plaques différemment inclinées par rapport aux axes de cristallisation, et en observant dans chaque cas la position des ellipses ou des cercles qui se dessinent sur les lames, on peut déterminer sans peine la forme des surfaces isothermes qu'on obtiendrait en échauffant la substance par un point intérieur.

Résultats.

Les axes des courbes sont proportionnels aux racines carrées des nombres qui mesurent les conductibilités de même direction; il y a peu d'intérêt à déterminer des chiffres exacts, mais on trouve sans peine, dans l'observation de ces courbes,

une caractéristique générale des espèces, capable de suppléer dans les matières opaques à l'absence des caractères optiques. La chaleur se conforme en effet comme la lumière à la symétrie générale de la cristallisation. Dans le système cubique, la surface isotherme est une sphère; dans les systèmes quadratique et rhomboédrique, qui admettent un axe de symétrie, c'est un ellipsoïde de révolution autour de cet axe; dans le système orthorhombique, un ellipsoïde à trois axes inégaux parallèles aux axes de cristallisation; pour les deux autres systèmes, on ne peut rien affirmer *a priori*.

M. Jannettaz a formulé l'importante loi qui suit : *Les clivages les plus faciles sont parallèles aux axes les plus grands de conductibilité thermique.*

Enfin il a montré que le signe optique et le signe thermique concordent le plus généralement : ainsi la tourmaline, la dolomie, la giobertite, la sidérose et l'anatase se sont montrées négatives; le corindon, la chabasie, le quartz, le rutile ont été trouvés positifs; par contre, l'émeraude, l'apophyllite, l'apatite et l'idocrase ont fait exception.

XLVIIe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DU RAPPORT DES CHALEURS SPÉCIFIQUES DE L'AIR, SOUS PRESSION CONSTANTE ET A VOLUME CONSTANT, ET MESURE DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Théorie.

Ce rapport a été déterminé la première fois par Clément et Desormes à l'aide d'une expérience qui est restée classique.

Désignons par C_p et c_v les deux chaleurs spécifiques de l'air : on sait, par la théorie mécanique de la chaleur, que

$$\frac{C_p}{c_v} = \gamma = 1 + \frac{pv\alpha}{Ec_v(1+\alpha t)},$$

p et v étant la pression et le volume de l'unité de poids de l'air à t degrés et E l'équivalent mécanique de la chaleur.

Or, quel est le sens physique de cette expression

$$\frac{pv\alpha}{Ec_v(1+\alpha t)}?$$

C'est l'augmentation de température θ qui résulte d'une compression de l'unité de volume égale à $\frac{\alpha}{1+\alpha t}$: θ ne se mesure pas directement, il est vrai, dans l'expérience de Clément et Desormes, mais, en comprimant de l'air qui était primitivement à une tension $H - h'$ et en observant sa pression $H - h''$ après refroidissement, on est conduit à la relation

$$\theta = \frac{h''}{h' - h''};$$

γ est donc connu, puisque nous savons que

$$\gamma = 1 + \theta.$$

Enfin nous pouvons calculer E en fonction de C_p et de γ : nous aurons pour l'air

$$E = \frac{29,2851}{0,2377 - \frac{0,2377}{\gamma}}.$$

Description.

Clément et Desormes employaient un ballon (*fig.* 64) de 80^{lit} de capacité environ, muni d'un large robinet B, communiquant avec l'atmosphère.

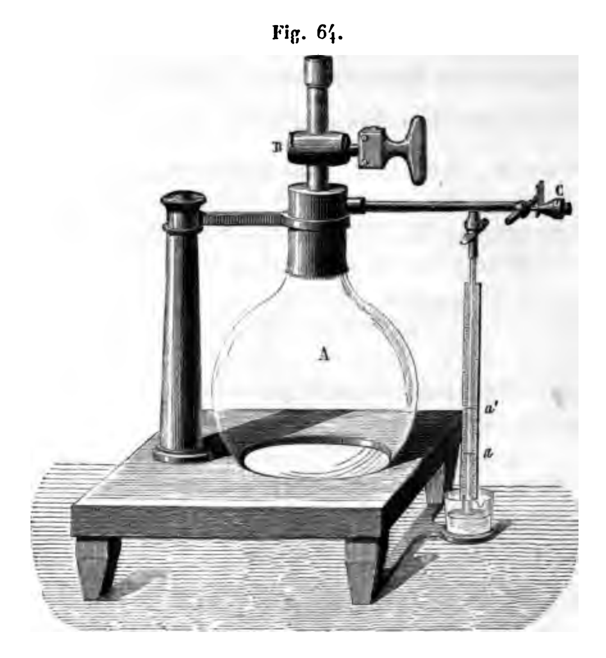
Un manomètre permettait de mesurer les pressions de l'air qu'on raréfiait par la tubulure c.

Cet appareil a été modifié par divers expérimentateurs, et notamment par Regnault et Cazin; mais on a conservé dans les laboratoires le modèle primitif de Clément et Desormes.

Le manomètre peut être garni d'eau ou d'huile d'amandes : on en mesure les hauteurs à l'aide d'une règle divisée, fixée derrière le tube.

La température des parois doit rester constante durant toute l'expérience : l'observateur se gardera donc d'appuyer les mains sur le ballon et il s'efforcera de le protéger de son mieux en l'entourant de serviettes parfaitement sèches, entre

Fig. 64.



lesquelles il pourra étendre des feuilles de papier. Cazin opérait dans des caisses remplies de sciure de bois ; mais il est difficile de reproduire cette disposition dans une salle de manipulations.

Manuel opératoire.

1° Le ballon est rempli d'air sec quelques heures avant l'expérience.

2° On y fait un vide h' de $0^m,020$ de mercure correspondant à environ $0^m,300$ d'huile ou $0^m,270$ d'eau (1) et l'on relève aussitôt

(1) V. Regnault, *Sur la détente statique des gaz* (*Annales de Chimie et Physique*, 4e série, t. XXIV, p. 342 ; 1871).

a pression barométrique H, qui doit rester invariable pendant les dix minutes que dure l'expérience.

3° Saisissant à pleine main le robinet B, l'opérateur l'ouvre vivement et le referme aussitôt. C'est pour un temps d'ouverture de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{3}$ de seconde que la marche de l'expérience a paru à Regnault la plus régulière.

4° Il faut immédiatement observer le manomètre : la pression extérieure s'est établie dans l'enceinte au moment de l'ouverture du robinet; mais une baisse rapide se produit sous l'action de la paroi, et le liquide remonte lentement jusqu'à une hauteur h''. On mesure h'' et l'on vérifie que le baromètre n'a pas varié.

Résultats.

La méthode par compression présente le grave inconvénient d'introduire dans le ballon de l'air humide à une température inconnue; il serait préférable d'opérer par détente sur de l'air qui fût d'abord à une pression $H+h'$ et enfin $H+h''$: on aurait, dans ce cas,

$$\theta = \frac{h''}{h'-h''}\,\frac{H+h'}{H+h''}.$$

Mais l'instrument n'est pas disposé pour cette expérience et les résultats seraient toujours incertains, parce qu'il se produit une succession d'ondes foulantes et dilatantes qui se propagent dans le ballon et se réfléchissent sur ses parois. Cazin a signalé le premier cette cause d'erreur.

On peut l'atténuer en répétant plusieurs fois l'expérience à de longs intervalles et en faisant la moyenne des résultats obtenus.

Observateurs.	θ.	γ.	E.
Clément et Desormes..	0,348	1,348	480,1
Gay-Lussac et Welter.	0,375	1,375	452,6
Masson..............	0,419	1,419	418,6
Cazin...............	0,41	1,41	425,3
Röntgen.............	0,405	1,405	426,8

CHAPITRE IX.

MAGNÉTISME.

Les expériences de magnétisme ne peuvent réussir que dans des laboratoires spéciaux d'où le fer soit rigoureusement exclu : toutes les serrures, ainsi que les garnitures métalliques des fenêtres et des portes, doivent y être en cuivre rouge ou en laiton, et il est nécessaire de soumettre les murs eux-mêmes à un rigoureux examen, car les architectes encastrent souvent des barreaux de fer ou des ancres massives dans les maçonneries.

L'opérateur enfin est tenu de déposer à l'entrée tous les objets magnétiques qu'il porte sur lui : un trousseau de clefs, un binocle, quelquefois même des boutons métalliques peuvent faire dévier les boussoles et provoquer d'interminables oscillations des aiguilles, et, par suite, des erreurs d'autant plus graves que la cause n'en est pas soupçonnée.

Les observatoires magnétiques sont généralement installés dans des pavillons à rez-de-chaussée, isolés au milieu de vastes jardins : il est peu de Facultés qui ne puissent réaliser une semblable disposition, indispensable au succès des manipulations qui suivent.

XLVIII[e] MANIPULATION.

MESURE DE LA DÉCLINAISON.

Théorie.

La déclinaison est l'angle que fait le méridien magnétique avec le méridien astronomique.

La mesure de la déclinaison comprend deux opérations distinctes :

1° La détermination de l'angle que fait l'axe magnétique d'un barreau aimanté avec une ligne de foi du plan horizontal prise pour origine ;

2° Celle de l'angle que fait cette ligne origine avec la méridienne du lieu : cette dernière mesure est purement astronomique.

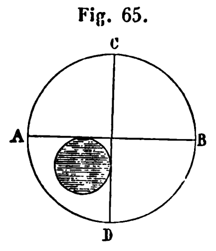
La première de ces opérations se fait aujourd'hui dans les observatoires à l'aide du magnétomètre de Gauss; mais la boussole de Gambey est restée l'instrument classique des laboratoires d'enseignement, et nous consacrerons cette manipulation à l'étude de son maniement.

Une seule mesure ne peut donner correctement la valeur de la déclinaison : il est nécessaire de combiner plusieurs lectures pour deux motifs. Et d'abord l'axe magnétique d'un barreau n'est pas une ligne matérielle qu'on puisse prendre pour repère, et il ne coïncide jamais rigoureusement avec l'axe géométrique de ce barreau; deuxièmement, la boussole peut présenter une excentricité relative du centre d'oscillation de l'aiguille et du cercle répétiteur. On s'affranchit de cette double cause d'erreur par la méthode du retournement et par une observation simultanée des positions occupées par les deux extrémités du barreau : il y a donc quatre observations à faire, deux avant et deux après le retournement, en supposant même que l'aiguille aimantée soit immobile dans le méridien magnétique. Or il est toujours long, quelquefois impossible et souvent inexact d'attendre que cette aiguille ait pris une position stable, et l'on préfère relever les positions extrêmes de l'aiguille dans son mouvement oscillatoire, ce qui double le nombre des valeurs à noter dans cette expérience et les porte à huit et même à seize lorsqu'on mesure les angles par deux verniers.

La détermination du méridien géographique se fait très facilement par le procédé suivant, dit *des hauteurs correspondantes*. On observe le Soleil quelque temps après son lever à l'aide de la boussole de Gambey, faisant office de théodolite : l'image de l'astre sera, par exemple, tangente à gauche et au-dessous, aux deux fils du réticule, ainsi qu'on le voit (*fig.* 65).

Puis on renouvelle cette même observation dans l'après-midi, sans déplacer la lunette, en faisant simplement tourner la boussole autour de son axe vertical; on fixe l'instrument au moment précis où le Soleil repasse à la même hauteur au-dessus de l'horizon que le matin, son image étant tangente à droite et au-dessous aux deux fils du réticule, et l'on prend la bissectrice de l'angle formé par les deux plans verticaux ainsi déterminés : c'est la direction du méridien.

Fig. 65.



Cette manière d'opérer est très correcte à l'époque des solstices, mais il est nécessaire de corriger le résultat de l'observation si l'on opère à tout autre moment de l'année. Appelant la variation de la déclinaison du Soleil par jour, δ cette déclinaison et λ la latitude du lieu, ce terme de correction est égal

$$0,16\,\varepsilon(\tan\lambda - \tan\delta);$$

au printemps, le méridien vrai est à l'ouest; en automne, est à l'est du méridien observé : l'écart peut dépasser 8′.

La méthode que nous venons de décrire exige deux observations : on peut se contenter d'en faire une seule, si l'on joint la détermination de l'heure vraie correspondante ([1]). En effet, le temps vrai étant H, le Soleil se trouve à ce moment dans un plan horaire faisant avec le méridien un angle $\alpha = 15H''$; on en déduit l'angle du vertical de l'astre avec le méridien en résolvant un triangle sphérique dont les sommets sont le zénith, le pôle et l'astre. Les Tables donnent la distance zénithale du pôle et la distance polaire du Soleil. Cette détermination n'est du reste à faire qu'une fois : car le méridien peut être tracé sur les murs du laboratoire par des repères immuables auxquels on rapportera toutes les expériences ultérieures.

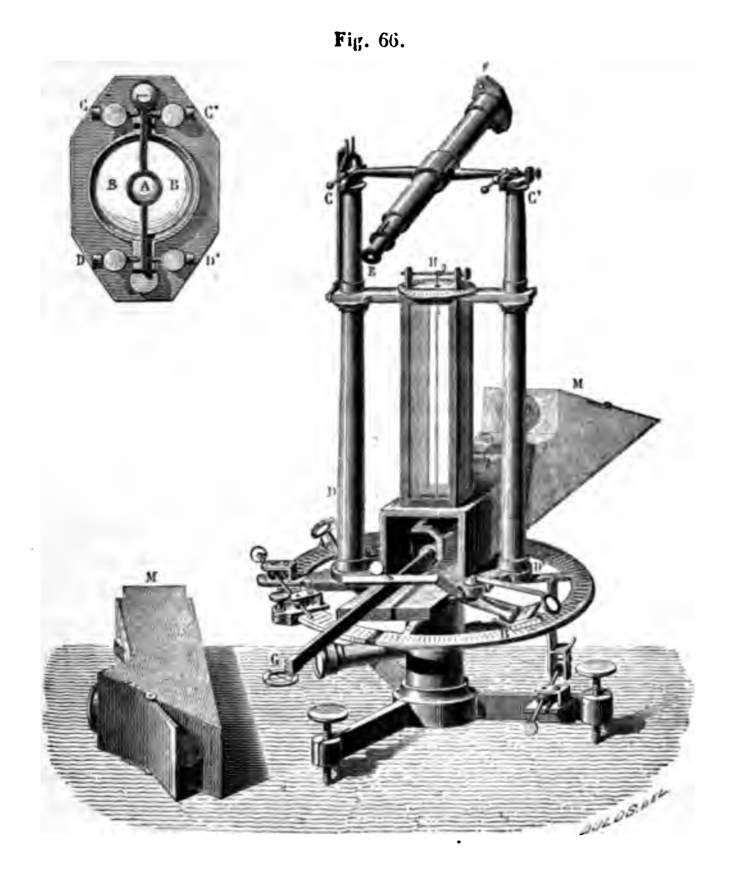
Description.

La boussole de Gambey (*fig.* 66) se compose d'un cercle azimutal fixe AB, monté sur un trépied à vis calantes : le barreau

([1]) *Voir*, pour la détermination de l'heure vraie, la LXXe manipulation.

aimanté est suspendu par un paquet de fils de cocon qui s'enroule sur le treuil H. Deux colonnes en cuivre CD et C′D′ soutiennent une lunette EF mobile dans un plan vertical : grâce à un double système de lentilles et d'écrans représentés

Fig. 66.



à gauche de la figure, cette lunette peut faire fonction de microscope et de télescope, à la volonté de l'opérateur. Toute la partie supérieure de l'appareil est portée par un axe vertical autour duquel on peut la faire tourner : deux verniers opposés permettent de relever les angles.

Le cercle horizontal est divisé en 360°, chaque degré en

6 parties, et les verniers en 60 parties, ce qui donne des appréciations à 10″ près.

Le barreau a $0^m,500$ de long, $0^m,015$ de haut et $0^m,003$ d'épaisseur : à chacune de ses extrémités se trouve un anneau muni de fils en croix, dont l'intersection coïncide sensiblement avec l'axe géométrique. L'aiguille repose dans un étrier qui permet le retournement. Avant de suspendre l'aimant, on glisse dans cet étrier une masse de cuivre rouge de même poids et on la laisse tourner sur elle-même sous l'influence de la torsion jusqu'à ce que cette torsion ait disparu. La masse est alors enlevée et remplacée par l'aimant : pendant cette opération, on a soin de tenir l'étrier pour l'empêcher de tourner.

Une boîte d'acajou, fermée à sa partie supérieure par des glaces bien pures et à faces parallèles, préserve l'aiguille des agitations de l'air.

Manuel opératoire.

1° L'opérateur règle la verticalité de l'axe.

2° La partie annulaire B de l'objectif étant couverte par un écran, il vise l'extrémité de l'aiguille en faisant tourner l'instrument autour de son axe vertical, puis il retourne la lunette et vise l'autre extrémité. Chaque lecture est effectuée à l'aide des deux verniers.

On note la moyenne des quatre observations : il y en aurait huit à faire si l'aiguille n'était pas entièrement immobile, parce qu'il faudrait relever les excursions de l'aiguille à droite et à gauche de sa position d'équilibre.

3° Le barreau est retourné sur lui-même de manière à diriger vers la terre la face qui regardait le ciel, et l'on répète les lectures comme ci-dessus. La moyenne est inscrite et combinée avec la précédente. En résumé, seize lectures font connaître l'angle de l'axe magnétique du barreau avec la ligne 0-180 du cercle azimutal.

4° Couvrant alors la partie centrale de l'objectif, on vise les mires avant et arrière qui définissent la méridienne, et on détermine l'angle qu'elles forment avec la ligne origine.

La déclinaison est la somme algébrique de ces deux angles.

Résultats.

D'après la carte de Lamont, la déclinaison avait les valeurs suivantes en 1850 dans les principales villes de l'Europe dont les noms suivent :

Paris	20°.35',8 O.
Greenwich	22.29,5
Bruxelles	20.40,7
Vienne	13.33,5
Leipzig	15.43,8

A l'observatoire de Montsouris, on a trouvé :

En janvier 1873	17°.33',0 O.
» 1875	17.26,2
» 1877	17.12,7
» 1878	17. 5,8
» 1879	16.56,4

La déclination était à Lille, en 1875, égale à 17°22'; le 1[er] janvier 1879, elle n'était plus que de 16°57' dans cette même ville.

D'après M. Marié-Davy la diminution moyenne annuelle serait de 9'.

XLIX[e] MANIPULATION.

MESURE DE L'INCLINAISON.

Théorie.

L'inclinaison magnétique est l'angle que fait avec l'horizon l'axe polaire d'une aiguille aimantée mobile autour de son centre de gravité, dans le méridien magnétique.

Deux méthodes sont en usage pour mesurer l'inclinaison : la première consiste simplement à diriger l'aiguille dans le plan du méridien et à lire l'angle qu'elle fait avec l'horizontale ; la seconde, dite *des azimuts rectangulaires*, n'exige pas la connaissance du méridien, car i' et i'' étant les inclinaisons observées dans deux plans rectangulaires quelconques, l'inclinaison vraie i est donnée par la formule

$$\cot^2 i = \cot^2 i' + \cot^2 i'' ;$$

c'est la seconde méthode que nous emploierons.

Voici les conditions requises par la théorie pour une boussole d'inclinaison :

1° La ligne 0-180 du limbe gradué doit être horizontale.

2° L'axe de figure de l'aiguille doit coïncider avec la ligne des pôles.

3° Enfin, le centre de gravité et l'axe de suspension doivent être confondus.

En réalité, aucune de ces conditions n'est remplie. On corrige les défauts de construction de l'instrument en tournant le limbe de 180°, en retournant l'aiguille sur elle-même et en changeant l'aimantation de signe, triple opération qui nécessite seize lectures dans chaque plan, attendu qu'on relève chaque fois la position des deux extrémités de l'aiguille pour éliminer les erreurs de division du limbe gradué.

Il y a donc trente-deux lectures à faire pour mesurer l'inclinaison.

Description.

La boussole d'inclinaison (*fig.* 67) est un véritable théodolite, dont on a remplacé la lunette par une aiguille aimantée ; nous y trouvons donc le cercle azimutal immobile CD et le limbe vertical FE qui peut être amené dans toutes les directions.

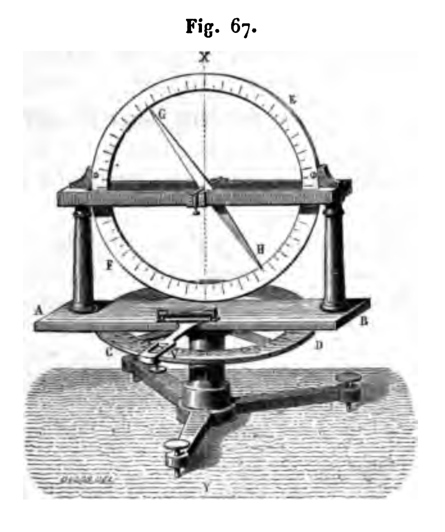
L'appareil est recouvert d'une cage de verre qui a été supprimée sur le dessin pour laisser voir toutes les parties dont il se compose.

Les pivots cylindriques de l'aiguille reposent sur deux plaques d'agate ou de cristal de roche. Pendant l'observation,

s pivots roulent sur leurs supports; mais deux fourchettes
e métal qu'on peut élever et abaisser à volonté permettent
e ramener l'axe au centre du limbe. En tournant, il sort de
ette position; mais, après l'avoir soulevé plusieurs fois, il finit
ar tomber à la place exacte pendant qu'il est dans la direction
xacte.

Le cercle azimutal est divisé en demi-degrés, mais on obient la minute au moyen d'un vernier; le limbe vertical marque les dix minutes. Il faut renoncer à déterminer l'incli-

Fig. 67.



naison avec une approximation supérieure à 10′ ou 15′. Le cercle de Barrow, qu'on emploie dans les observatoires, donne au contraire la minute : mais cet instrument est trop coûteux pour qu'on puisse le mettre entre les mains des élèves.

Pour désaimanter l'aiguille et renverser ses pôles, on la couche sur une pièce de bois présentant une cavité et on l'y assujettit au moyen d'une pince de laiton; puis on promène sur elle, du centre vers les bouts, deux barreaux aimantés que l'on tient dans chaque main, par leurs pôles contraires, suivant le procédé de Duhamel, dit *de la touche séparée*. L'opérateur écarte à la fois les deux aimants et les fait glisser en sens inverse l'un de l'autre, du milieu aux extrémités correspon-

dantes. Cette opération étant répétée un certain nombre de fois, l'aiguille devient un aimant plus ou moins puissant dont le pôle austral se trouve du côté sur lequel a passé le pôle boréal du barreau dont on se servait. L'élève se souviendra que l'intensité de l'aimantation n'influe pas sur la détermination de l'inclinaison.

Manuel opératoire.

1° Avant de commencer l'observation, on doit d'abord mettre l'instrument exactement vertical au moyen de ses vis calantes.

2° On fait une première mesure dans un plan quelconque, en relevant la position des deux extrémités de l'aiguille : on trouve généralement une différence sensible entre les deux valeurs observées.

3° On tourne le cercle vertical de 180°, lus au cercle horizontal, en sorte que, si l'instrument faisait d'abord face à l'est, il fasse maintenant face à l'ouest, et l'on répète les deux lectures.

L'aimant est alors enlevé de ses supports et retourné de façon que le bout de son pivot, qui se dirigeait sur le devant, soit tourné vers le fond de l'instrument, et l'on refait les quatre lectures précédemment indiquées.

4° On retire enfin l'aimant et l'on intervertit ses pôles : huit nouvelles lectures sont faites dans ces nouvelles conditions.

Résultats.

D'après Lamont, l'inclinaison avait en 1850 les valeurs ci-dessous, dans les villes dont les noms suivent :

	° ′
Paris	65.42,2
Greenwich	68.48,0
Bruxelles	67.54,8
Vienne	64.22,0
Leipzig	67. 5,0

A Paris, on a trouvé, à l'observatoire de Montsouris :

En janvier 1876	65°.37′,4
» 1877	65.36,7
» 1878	65.33,4
» 1879	65.31,8

L^e MANIPULATION.

DÉTERMINATION DU MOMENT MAGNÉTIQUE D'UN BARREAU AIMANTÉ.

Note sur les unités magnétiques de Gauss.

L'unité de magnétisme est la quantité que doivent posséder deux molécules pour exercer l'une sur l'autre, à l'unité de distance, une action égale à l'unité de force.

Gauss a choisi le millimètre pour unité de distance; dans le but de rendre comparables les observations faites en différentes stations, il a adopté pour unité de force celle qui, appliquée à la masse de 1^mmc d'eau distillée à 4°, lui communiquerait, au bout d'une seconde, une accélération égale à 0^m,0001 : l'unité de force est donc égale à $\frac{1}{9808,8}$ milligramme et c'est une quantité constante, puisque le poids varie proportionnellement à g [1].

Le système de Gauss repose donc sur le millimètre, la masse du milligramme et la seconde.

---

[1] On tend à substituer aujourd'hui aux unités de Gauss le système C. G. S. (centimètre, masse-gramme et seconde); mais nous avons cru devoir conserver pour le magnétisme l'ancien système, qui était devenu classique. Le lecteur trouvera plus loin deux Notes sur les unités C. G. S. de l'Association britannique (p. 222 et 242).

Théorie.

Considérons un aimant d'une longueur $2l$, mobile autour d'un axe vertical; il est soumis à l'action de la composante horizontale du magnétisme terrestre. Cette action se réduit à un couple dont le moment est égal à $Tm.2l$, si nous appelons T la force horizontale exercée par la terre sur l'unité de magnétisme et m la quantité de magnétisme concentrée aux pôles dont la distance est supposée égale à $2l$.

On représente ce moment par le produit MT, en posant $M = 2ml$, et on l'appelle le moment magnétique du barreau aimanté.

Il suffit de faire osciller le barreau pour déterminer son moment magnétique en valeur absolue, en fonction des unités de Gauss: en effet on a

$$t = \pi\sqrt{\frac{K}{MT}},$$

d'où

$$MT = \pi^2\frac{K}{t^2},$$

en appelant K le moment d'inertie de ce pendule et t la durée de l'oscillation.

K se détermine mieux par l'expérience que par le calcul, car un barreau ne présente pas de forme suffisamment régulière pour qu'on puisse admettre qu'il oscille rigoureusement autour de son centre de gravité; du reste, il est toujours nécessaire de surcharger une de ses extrémités par un léger contrepoids pour le maintenir horizontal, ce qui détruit la symétrie par rapport à l'axe. Gauss employait donc le procédé suivant [1]: il suspendait par un fil aux extrémités du barreau deux poids cylindriques de masse totale μ, de rayon ρ,

---

[1] *Intensitas vis magneticæ terrestris ad mensuram absolutam revocata* (*Carl Friedrich Gauss Werke*, V Band, p. 74). « Suppositionem gratuitam massæ perfecte homogenæ formæque perfecte regularis ægre admitteremus, et pro experimentis nostris rem per talem calculum expedire omnino impossibile est. »

à une distance λ de l'axe de suspension, et il observait la durée τ d'une oscillation; dans ces conditions, on peut écrire, en appelant K' le moment d'inertie des deux masses auxiliaires non magnétiques,

$$K = K' \frac{t^2}{\tau^2 - t^2}$$

et

$$K' = \mu(\lambda^2 + \tfrac{1}{2}\rho^2),$$

la masse μ étant exprimée en milligrammes et ρ en millimètres.

Quelques corrections sont nécessaires : et d'abord la durée t de l'oscillation observée doit être divisée par $\left(1 + \frac{1}{4}\sin^2\frac{\alpha}{4}\right)$ pour une amplitude α; de plus, il faut tenir compte de la force de torsion du fil de cocon auquel le barreau est suspendu, car elle diminue sensiblement la durée des oscillations. Cette correction se fait sans peine; il suffit en effet de tourner successivement la tête du fil de 360° dans les deux sens et de prendre la moyenne u des déviations correspondantes de l'aimant. Si φ est la force de torsion, on aura

$$(360 - u)\varphi = \text{MT} \sin u = \text{MT}u$$

et

$$\frac{\varphi}{\text{MT}} = \frac{u}{360 - u} = \theta,$$

d'où

$$\text{MT} = \frac{\pi^2 K}{t^2(1 + \theta)}.$$

Description.

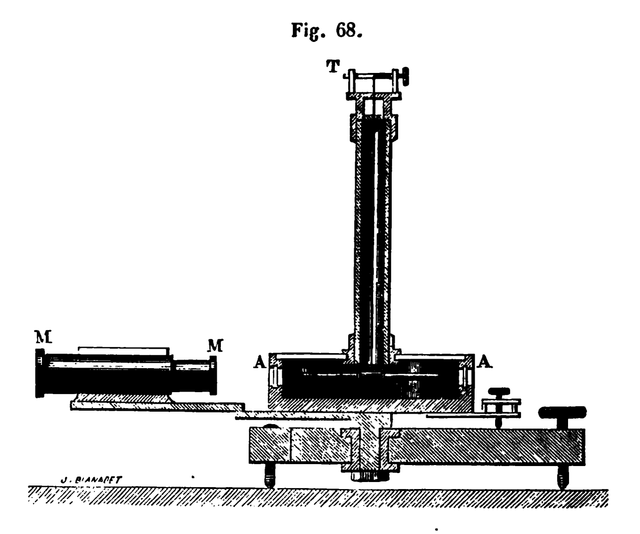
La boussole d'intensité de Gambey, dont on se sert pour ces expériences, se compose d'une caisse ronde de bois AA (*fig.* 68), percée de deux ouvertures diamétralement opposées : un arc gradué que parcourt l'extrémité de l'aiguille mesure les amplitudes et la manière dont elles décroissent. Le microscope MM sert à compter les oscillations quand elle deviennent très petites.

L'aimant, de $0^m,100$ à $0^m,150$ de longueur, est suspendu par

un faisceau de fils de soie de cocon à une tête de torsion et à un treuil T au moyen duquel on peut l'élever ou l'abaisser: on l'engage dans une chape de papier ou mieux encore dans un étrier de cuivre dont la période d'oscillation doit être égale à celle de l'aiguille.

La longueur des fils de cocon sera d'au moins $0^m,50$ de manière à réduire au minimum le moment de torsion du faisceau; d'autre part, on formera le paquet du minimum de brins en faisant porter à chacun d'eux 30^{gr} environ.

Fig. 68.



Pour empêcher l'enchevêtrement des fils, on les tend d'abord chacun par un poids distinct, après les avoir traités par l'eau de savon bouillante, puis on les assemble en faisceau en les disposant parallèlement les uns à côté des autres : le tout est finalement enduit de suif. Ces fils, ainsi préparés et chargés de leur équipage dans lequel une masse de cuivre remplace l'aimant, mettent un certain temps à prendre leur équilibre définitif; on n'introduit le barreau dans sa monture qu'après avoir constaté une position stable.

Quand le barreau pèse plus de 500^{gr} on substitue avantageusement aux fils de cocon un fil d'argent ou de laiton de $\frac{2}{10}$ à $\frac{3}{10}$ de millimètre de diamètre.

Un aimant de la dimension usuelle effectue une oscillation ı six ou huit secondes; pour mesurer cette durée on ne peut ridemment se contenter d'une seule observation, mais on en ıit une centaine au moins: voici comment on procède le plus ommunément.

Assis en face de la boussole, l'opérateur suit les mouve-ıents du barreau et, au moment précis de son passage devant n repère tracé sur la cage de verre, il met en marche une ıontre à secondes qu'il arrête par exemple au 200e passage; intervalle de temps T relevé au chronomètre, divisé par 200, onne au $\frac{1}{200}$ de seconde près la valeur de t à introduire dans les rmules établies ci-dessus.

Mais il est souverainement fastidieux de compter 200 oscil-tions de suite; la méthode suivante épargne cet ennui à bservateur.

Il note d'abord les temps auxquels correspondent six pas-ges successifs de l'aiguille au repère, et il prend la moyenne s temps auxquels ont eu lieu le premier et le sixième, le uxième et le cinquième, le troisième et le quatrième passage; ı calculant la moyenne de ces moyennes, il établit le moment act du passage de l'aiguille à sa position d'équilibre stable ıtre le troisième et le quatrième passage: c'est le temps itial de l'expérience. L'opérateur peut s'éloigner dès lors de ıimant; il lui suffira de répéter la même opération un quart heure après pour déterminer par le même procédé le temps nal: l'expérience aura duré par exemple N secondes. Faisant ors la moyenne du premier et du troisième, du cinquième t du sixième passage, et divisant la différence par 4, il déter-ıinera une durée approchée de l'oscillation au début de l'ob-ervation. L'intervalle de temps N, pendant lequel l'aimant a scillé, étant divisé par cette durée, donne un nombre qui loit être très voisin d'un nombre entier; divisant l'intervalle ar le nombre entier, on en déduit t.

Un exemple de calcul qu'on trouvera aux *Résultats* ne lais-sera subsister aucune incertitude sur les détails de cette mé-thode (¹).

(¹) *Anleitung zur Bestimmung der Schwingungsdauer einer Magnetnadel* (*Carl Friedrich Gauss, Werke,* V Band, p. 374 et s.). La méthode a été un peu simplifiée.

Notons qu'un aimant peut osciller plus d'une heure entre les moments où les amplitudes des oscillations sont trop grandes pour se prêter au calcul et trop petites pour qu'on les observe.

Manuel opératoire.

1° L'aiguille est d'abord convenablement suspendue et rendue bien horizontale; puis on l'écarte de quelques degrés de sa position d'équilibre stable ([1]).

2° L'oscillation étant devenue bien régulière, on en détermine, comme il a été dit ci-dessus, la durée *t*.

3° La même opération est répétée après avoir chargé l'aiguille des poids supplémentaires; la durée *t* des oscillations permet de calculer K et par suite MT.

Résultats.

Dimensions de l'aimant oscillant :

Longueur	150mm
Section	8mm sur 8mm
Poids	73810mgr

1° Détermination de *t* :

Nos.	PREMIÈRE OBSERVATION.		DEUXIÈME OBSERVATION.	
	Temps des passages.	Moyennes.	Temps des passages.	Moyennes.
1	0′ 0″,0	3 et 4... 20,3	15′ 3″,2	3 et 4... 22,6
2	8,4		11,2	
3	16,0	2 et 5... 20,1	18,6	2 et 5... 22,6
4	24,3		26,6	
5	31,8	1 et 6... 20,0	33,9	1 et 6... 22,5
6	40,0		41,8	
	Moyenne...... 0′ 20″,1		Moyenne..... 15′22″,6	

([1]) C'est par erreur que plusieurs auteurs indiquent une amplitude d'oscillation de 30°; voici ce que dit Gauss à propos d'une de ses meilleures observations : « In experimento amplitudo oscillationum acus fuit initio 1°10′ 2″ post 177 oscillationes, 0°45′ 35″; post 677 oscillationes, 0° 6′ 44″.

Différence	902",5
Moyenne 1 et 2	4",2
» 5 et 6	35",9
Différence	31",7

$$\text{Durée approchée d'une oscillation} = \frac{31'',7}{4} = 7'',9,$$

$$\text{Nombre d'oscillations} \ldots\ldots\ldots\ldots \frac{902,5}{4} = 114,1$$

$$\text{Durée exacte d'une oscillation} = \frac{902,5}{114} = 7'',917.$$

2° Détermination de K.

Somme des poids auxiliaires	$\mu = 29420^{mgr}$
Bras de levier	$\lambda = 70^{mm}$
Rayon des masses auxiliaires	$\rho = 10^{mm}$
K'	140158000
τ	11",203
K	138756420

3° Détermination de θ.

$$\theta = \frac{1,2}{360 - 1,2} = 0,0033.$$

4° Calcul de MT.

$$MT = \frac{\overline{3,1416}^2 . 138756420}{\overline{7,917}^2 . 1,0033} = 22284735.$$

LIe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DE L'INTENSITÉ ABSOLUE DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

Théorie.

L'équation de Coulomb, déduite de la théorie du pendule magnétique, nous a donné MT; en étudiant l'action réciproque

de deux aimants placés à une grande distance par rapport à leur longueur, Gauss a réussi à calculer $\frac{M}{T}$. Ces deux équations permettent de déterminer M et T, à condition d'employer comme aimant déviant le barreau que nous avons fait osciller dans la précédente manipulation.

On a

$$MT = A$$

et

$$\frac{M}{T} = B,$$

d'où

$$T = \sqrt{\frac{A}{B}}.$$

L'aiguille NS (*fig.* 69) étant d'abord en équilibre dans le méridien magnétique, on la soumet à l'action du barreau que l'on dispose horizontalement dans le même plan en A, A', B B', C, C', D et D' : à chacune de ces positions correspond une déviation φ de l'aiguille. Nous aurons par exemple $\pm\varphi$, quand le barreau sera en A ou B; $\pm\varphi'$ en A' ou B'; $\pm\varphi_1$ en C ou D; enfin $\pm\varphi'_1$ en C' ou D'. Appelant R, R', R_1 et R'_1 les distances du centre O de l'aiguille au centre du barreau, nous pourrons écrire [1]

$$\frac{M}{T} = \frac{1}{2}\,\frac{R^5 \operatorname{tang}\varphi - R'^5 \operatorname{tang}\varphi'}{R^2 - R'^2}$$

et

$$\frac{M}{T} = \frac{R_1^5 \operatorname{tang}\varphi_1 - R_1'^5 \operatorname{tang}\varphi_1'}{R_1^2 - R_1'^2},$$

suivant la disposition adoptée pour l'expérience.

---

[1] Le calcul classique de Gauss conduit à la relation

$$R^3 \operatorname{tang}\varphi = 2\frac{M}{T}\left(1 + \frac{x}{R^2}\right),$$

dans laquelle x est une constante de l'aimant; on a de même, pour une distance R',

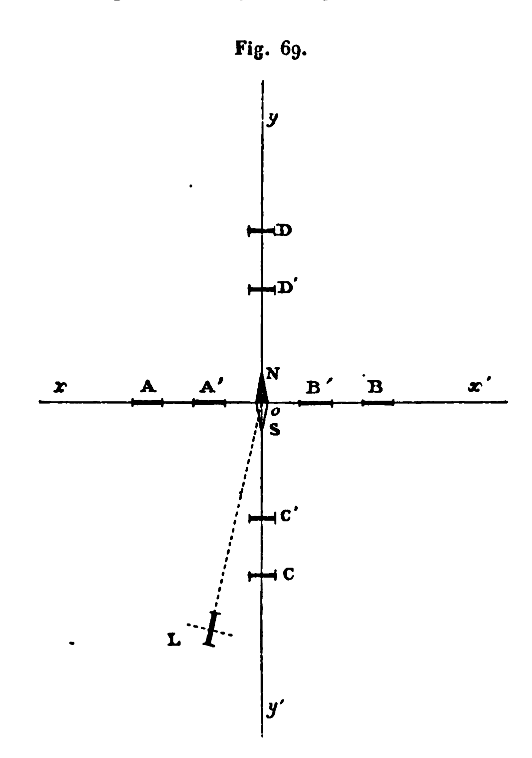
$$R'^3 \operatorname{tang}\varphi' = 2\frac{M}{T}\left(1 + \frac{x}{R'^2}\right).$$

On en déduit sans peine

$$R^5 \operatorname{tang}\varphi - R'^5 \operatorname{tang}\varphi' = 2\frac{M}{T}(R^2 - R'^2).$$

Il importe de répéter ces observations dans les conditions les plus diverses pour se mettre à l'abri des erreurs accidentelles; généralement on fait occuper à l'aimant les huit positions de la *fig.* 69, et l'on calcule la moyenne des angles correspondant à des positions symétriques.

Fig. 69.



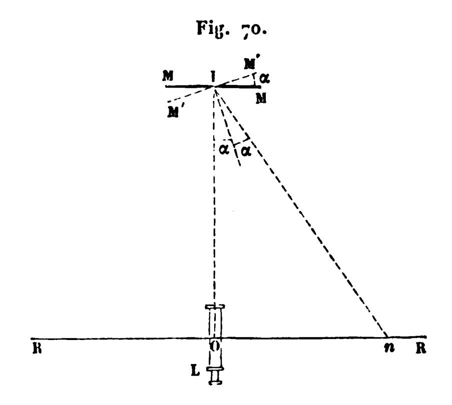
Il faut remarquer que la température de l'aimant déviant doit rester constante pendant toute la durée de l'expérience, car son intensité décroîtrait rapidement à mesure que sa température s'élèverait. Quant à l'intensité de l'aimant suspendu, elle n'intervient pas dans le calcul, et il n'y a pas lieu de s'occuper de ses variations.

La déviation de l'aiguille se mesure par la méthode de Poggendorff : un petit miroir plan vertical M (*fig.* 70) est attaché au fil de suspension, et l'on y observe, à l'aide de

la lunette L, l'image de la règle O installée en face de l'appareil.

Quand l'aiguille est au zéro, on voit l'image du point milieu O se former sous la croisée des fils de la lunette; le miroir

Fig. 70.



vient-il à tourner d'un angle α, on aperçoit à la même place l'image d'une division n, et il est facile de démontrer que

$$\operatorname{tang} 2\alpha = \frac{n}{\mathrm{IL}},$$

ou approximativement

$$\alpha = \frac{n}{2\mathrm{IL}}.$$

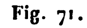
Description.

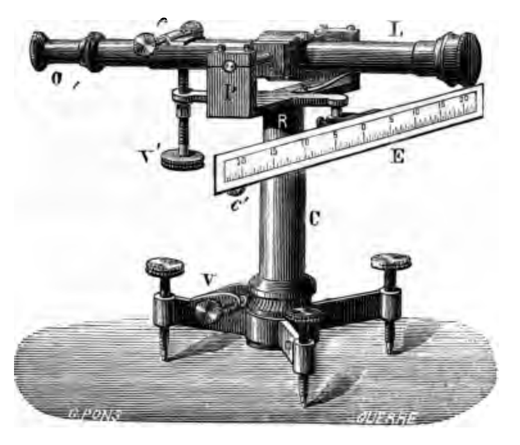
Le magnétomètre unifilaire de Gauss, qu'on emploie pour déterminer $\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{T}}$, se compose essentiellement d'une aiguille suspendue par des fils de cocon dans une cage de verre. Un petit miroir argenté est attaché solidement à l'extrémité ou sur l'axe de rotation de l'aiguille, dans une position telle qu'il soit sensiblement normal à l'axe magnétique.

La lunette par laquelle on mesure les déviations est représentée *fig.* 71; ce modèle, construit par MM. Ducretet et Cie, se

rête à un réglage très rapide, grâce à la mobilité relative de outes les pièces dont il se compose.

Les vis V et V′ gouvernent la lunette et un dispositif ingénieux permet de déplacer l'échelle E en tous sens. Cette


Fig. 71.



helle, sur laquelle les chiffres sont renversés (*fig.* 72), doit tre disposée normalement à l'axe optique du viseur.

Fig. 72.



L'aiguille, qui est très mobile, n'arrive jamais au repos, et l'observateur est obligé de noter ses positions successives extrêmes, maximum et minimum, et d'en prendre la moyenne; lorsque les oscillations ont une grande amplitude, il peut même devenir nécessaire de calculer une moyenne de trois ou de cinq valeurs, comme nous l'avons fait pour les balances de précision.

Le barreau déviant est posé sur un chariot de laiton, qui glisse sur quatre règles graduées placées parallèlement et perpendiculairement au méridien suivant xy et $x'y'$ (*fig.* 69).

Le plan de ces règles doit être parfaitement horizontal et contenir l'aiguille; on leur donne 1^m de longueur environ à partir de l'axe d'oscillation de l'aiguille.

La distance du barreau à l'aiguille ne peut pas être inférieure à six fois sa longueur; de plus, on a reconnu qu'il est avantageux de faire varier R et R', dans les deux opérations successives, dans le rapport de trois à quatre; on fera, par exemple, R et R' égal à $0^m,400$ et à $0^m,300$ avec une aiguille de $0^m,060$.

Quand l'opérateur déplace le barreau, il doit avoir soin de le porter verticalement, le centre dans le plan des règles et de l'aiguille : de la sorte son action est nulle sur cette aiguille, et l'on évite les grandes oscillations et les mouvements rapides qui s'opposent aux lectures.

Manuel opératoire.

1° On observe l'azimut de l'aiguille avant d'en approcher le barreau et l'on dispose la lunette L de manière à pouvoir mesurer un angle de 24° environ de déviation : c'est la plus forte que Weber ait pu produire dans le cours de ses nombreuses recherches.

2° Le barreau est placé en A, le pôle austral à l'ouest, par exemple, et l'on note la position de l'aiguille; puis on le retourne, en conservant son centre au même point, mais en dirigeant le pôle austral à l'est. La déviation observée est égale à 2φ. La distance du centre du barreau au centre de l'aiguille se lit au millimètre près sur la règle graduée.

3° En B, l'expérience doit fournir la même valeur de φ.

4° En A' et B', on détermine φ'.

5° Enfin on répète les mêmes mesures en plaçant le centre du barreau dans le méridien et on évalue les angles φ_1 et φ'_1.

Résultats.

Voici les résultats d'une expérience faite à Lille dans des conditions défavorables; je ne donnerai que les valeurs rela-

tives aux positions A et A′; elles suffisent pour indiquer la série des calculs à effectuer :

$$\varphi = 10^\circ 18', \quad \varphi' = 21^\circ 30',$$
$$R = 0^m,400, \quad R' = 0^m,300;$$
$$\frac{M}{T} = \frac{1}{2}\,\frac{\overline{400}^5 \operatorname{tang} 10^\circ 18' - \overline{300}^5 \operatorname{tang} 21^\circ 30'}{\overline{400}^2 - \overline{300}^2} = 6230868.$$
$$T = \sqrt{\frac{22284735}{6230868}} = 1,891.$$

Cette valeur n'est pas fort éloignée de la vérité : à Bruxelles, d'après Lamont, l'intensité horizontale de la force magnétique terrestre était égale à 1,77 en 1850, alors qu'à Paris sa valeur moyenne était de 1,86; depuis lors elle a augmenté, et, le 1er janvier 1879, on la trouvait à Paris égale à 1093.

Pour avoir l'intensité totale, il reste à diviser cette quantité par le cosinus de l'inclinaison.

L'accroissement annuel est égal à 0,004.

LIIe MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME DANS LES AIMANTS.

Théorie.

Coulomb déterminait le magnétisme en chaque point d'un aimant de faible section en le disposant en face de l'aiguille de sa balance, à une très petite distance, et en mesurant les torsions qui équilibraient la répulsion ou l'attraction magnétique : les angles étaient proportionnels au carré de l'intensité sur la section étudiée.

M. Jamin [1] a heureusement modifié cette opération en

[1] *Journal de Physique*, t. V, p. 41 et 73, et *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 1874, p. 75 et 76.

plaçant l'aimant sur un chariot horizontal et en amenant le point que l'on veut examiner sous un petit contact d'épreuve qui est attiré; on mesure ensuite la force d'arrachement P et l'on admet avec Coulomb que $\sqrt{P}$ mesure l'intensité au point touché.

En effet, ce contact, qui est formé par une longue aiguille de fer, attire au-dessous de lui sur l'aimant une quantité de magnétisme msi, proportionnelle à sa section s et à l'intensité magnétique i au point touché.

La quantité attirée par unité de surface sera mi et, comme une égale quantité de magnétisme contraire sera attirée par influence sur chaque unité de surface du contact, l'attraction sera $m^2 i^2$ par unité de surface et $m^2 i^2 s$ pour la totalité. C'est ainsi que M. Jamin démontre que l'attraction en chaque point doit être proportionnelle à la section s des fils de fer employés.

Description.

On emploie pour contact un fil de fer terminé par une petite sphère : dans le but de rendre toutes les mesures comparables, on détermine une fois pour toutes le facteur par lequel il faut multiplier les forces d'arrachement de ce *clou d'épreuve* pour les ramener à celles qu'on obtiendrait avec un contact de fer cylindrique de $0^m,150$ de longueur et de $0^m,001$ de diamètre.

M. Blondlot prend pour contact une petite boule confectionnée avec du fer réduit et de la térébenthine de Venise : cette sphère, très peu magnétique, ne peut modifier l'intensité au point touché et elle agit comme si elle était infiniment petite.

Pour mesurer la force d'arrachement P, on attache le clou d'épreuve A (*fig.* 73) au plateau B d'une balance, et à l'autre plateau un ressort spiral en cuivre DE; il est prolongé par un fil de soie EF qui s'enroule sur un treuil et sert à tendre le ressort. L'allongement de celui-ci se mesure par le raccourcissement du fil : à cet effet, le treuil porte une vis à tête graduée K qui s'enfonce dans un écrou L; la longueur du fil qu'on enroule est mesurée par la longueur du nombre frac-

ire des tours ou par $2\pi rn$. D'autre part, la loi de l'al-
nent de ce ressort est celle de l'élasticité de traction; on
r l'allongement e,

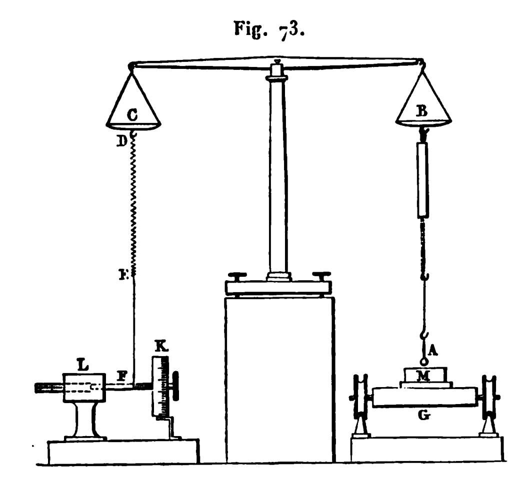
$$e = 2\pi rn = \text{KLP},$$

ıt la longueur du ressort; d'où

$$\text{P} = \frac{2\pi r}{\text{KL}} n = \text{R}n.$$

constante R s'évalue directement en mettant en B un

Fig. 73.



connu et en comptant le nombre de tours nécessaires
l'équilibre.

Manuel opératoire.

ıprès avoir constaté que le clou d'épreuve est dans un
arfait de propreté et de poli, on amène le point de l'ai-
ɿue l'on veut étudier dans la verticale et on établit l'adhé-
; puis, allongeant le ressort jusqu'à l'arrachement, on lit
ıbre n. L'opération doit être faite lentement et surtout
èrement.

2° On agit de même aux divers points de l'aimant : il est commode de tracer à l'avance sur sa surface, à des distances connues, des lignes perpendiculaires à son axe géométrique. Après avoir déterminé $\sqrt{P}$ en ces points, on construira la courbe des intensités en portant ces valeurs en ordonnée, et en abscisse les distances des sections étudiées à la section moyenne.

Résultats.

Cette méthode permet, suivant l'expression pittoresque de M. Jamin, de disséquer un aimant et de découvrir les détails de sa distribution.

Nous nous bornerons à établir la loi suivant laquelle les intensités varient avec les distances aux extrémités. Biot avait indiqué la formule

$$y = A(K^{-x} - K^{(l-x)}),$$

en prenant l'origine à une extrémité et appelant l la longueur du barreau; chaque branche répond à la formule

$$y = AK^{-x}.$$

Si donc, dans un cylindre indéfini, l'intensité magnétique en un point est égale à A, elle est connue à une distance x de ce point.

Cette formule se vérifie sans peine; voici les résultats des expériences faites par M. Jamin sur une lame mince de $0^m,001$ d'épaisseur dont la largeur était de $0^m,030$ et la longueur de 1^m:

x.	0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
y....	6.35	5,10	4,64	3,71	2,92	2,27	1,70	1,28	0,95
K....	»	1,24	1,11	1,29	1,26	1,70	1,33	1,29	1,28

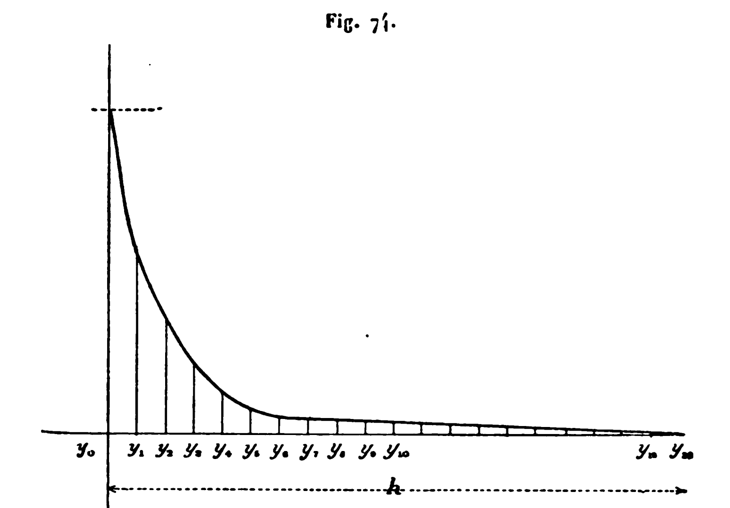
L'intensité totale du magnétisme de l'aimant se calcule en évaluant l'aire de la courbe : la formule de Thomas Simpson s'y prête sans difficulté. « L'aire de la courbe a pour valeur le tiers de l'intervalle de deux ordonnées consécutives, multiplié par la somme des ordonnées extrêmes, plus quatre fois la somme des ordonnées d'indice impair, plus deux fois la somme des ordonnées d'indice pair. »

Le résultat du calcul s'approche d'autant plus de la vérité que le nombre des ordonnées est plus considérable.

Nous aurons, pour un aimant dont la courbe des intensités est celle de la *fig.* 74,

$$S = \frac{1}{3} h [y_0 + y_{20} + 4(y_1 + y_3 + \ldots) + 2(y_2 + y_4 + \ldots)].$$

Fig. 74.



M. Jamin a démontré de plus cette importante proposition, dont les élèves pourront vérifier l'exactitude :

« Deux armatures appliquées à, un aimant tout formé changent la distribution, mais non la somme du magnétisme. »

CHAPITRE X.

ÉLECTROSTATIQUE.

Note sur les unités électrostatiques C.G.S (1).

Les unités électriques ont été choisies d'abord d'une manière arbitraire et indépendamment les unes des autres; mais on reconnut bientôt la nécessité de les faire dériver toutes de trois unités *fondamentales* de longueur, de masse et de temps (2).

L'Association britannique avait adopté pour ces unités le centimètre, la masse du gramme et la seconde : le Congrès international des électriciens a sanctionné ce choix dans sa séance du 21 septembre 1881.

L'habitude a prévalu de désigner ce système par le symbole C.G.S.

L'unité dérivée de force a reçu le nom de *dyne :* c'est la force qui donnerait en une seconde à la masse-gramme une accélération de $0^m,01$.

La dyne égale $\frac{1}{980,8}$ du poids du gramme ou $0^{gr},001$ environ.

L'unité dérivée de travail s'appelle *erg :* c'est le travail développé par une dyne pendant un parcours de $0^m,01$. Ainsi 1^{gr} tombant de $0^m,01$ développera un travail de 981^{ergs}. L'erg est égal à $\frac{1}{98086000}$ de kilogrammètre.

(1) *Traité expérimental d'Électricité et de Magnétisme,* par Gordon, traduction Raynaud; *Leçons sur l'Électricité et le Magnétisme,* par Mascart et Joubert, 1882.

(2) Si la même logique avait présidé au choix des unités de chaleur, on eût supprimé l'obligation de multiplier par 425 les calories dépensées dans une transformation pour déterminer le travail équivalent.

On appelle *dimensions* d'une unité dérivée les puissances auxquelles les unités fondamentales entrent dans l'expression algébrique de cette unité; c'est une relation qui la lie aux unités fondamentales : en désignant par LMT les unités de longueur, de masse et de temps, nous pouvons exprimer sans peine les dimensions des unités mécaniques principales.

Unités.	Dimensions.
Vitesse v	LT^{-1}
Accélération γ	LT^{-2}
Force F	LMT^{-2}
Travail W	L^2MT^{-2}

Les grandeurs les plus importantes de l'électrostatique sont la *quantité* Q, le *potentiel* V et la *capacité* C.

L'unité de quantité est la quantité d'électricité qui, à $0^m,01$ de distance, repousse avec la force d'une dyne une quantité égale d'électricité de la même espèce; la loi de Coulomb donne, pour la force répulsive F qui s'exerce entre deux masses égales à Q à la distance d,

$$F = \frac{Q^2}{d^2},$$

d'où

$$Q = dF^{\frac{1}{2}} = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

L'unité de potentiel est le potentiel produit par une unité d'électricité à une distance de $0^m,01$:

$$V = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

L'unité de capacité est la capacité d'un conducteur sphérique isolé d'un centimètre de rayon, ou encore, c'est la quantité d'électricité à l'unité de potentiel qu'un conducteur peut contenir :

$$C = \frac{Q}{V} = L.$$

C'est donc une longueur; en effet, la capacité d'une sphère est égale à son rayon.

Un grand nombre de mesures absolues ont été effectuées

par Sir W. Thomson à l'aide de ses électromètres : il serait difficile de reproduire ces expériences si précises et si délicates dans un laboratoire d'enseignement, mais nous croyons nécessaire d'en signaler quelques résultats.

Le potentiel absolu d'un élément Daniell en unités électrostatiques est égal à 0,00374.

Une balle conductrice de $0^m,01$ de diamètre, électrisée par mille éléments Daniell, prend donc une charge de

$$0,5.3,74 = 1,87 \text{ unités d'électricité.}$$

Une machine à frottement, donnant des étincelles de $0^m,300$ de longueur, a un potentiel égal à 300, et la balle conductrice prend dans ce cas une charge égale à 150 unités.

LIIIe MANIPULATION.

MESURE DU POTENTIEL D'UNE SOURCE EN VALEUR ABSOLUE.

Théorie.

La balance de Coulomb est un des instruments qui conviennent le mieux à la mesure des masses électriques en valeur absolue; en faisant agir sur une aiguille électrisée mobile une force antagoniste qui la maintienne en équilibre à une certaine distance malgré la répulsion d'un second corps électrisé fixe, on évalue cette répulsion et l'on en déduit les quantités ellesmêmes.

Si les boules sont assez éloignées pour qu'on puisse n'introduire dans le calcul que la distance de leurs centres et si leurs charges sont égales, on a

$$m^2 = 4lC(T)\sin\frac{\alpha}{2}\tan\mathrm{g}\frac{\alpha}{2}.$$

Toutes les quantités que renferme le second membre de cette égalité peuvent être déterminées directement : l est

yon de l'aiguille mobile, C le moment du couple de torsion
ı fil pour un angle égal à l'unité, α la distance angulaire des
ux boules et T l'angle dont le fil a été tordu pour équilibrer
force répulsive des masses en présence ([1]).

Le potentiel des boules en présence, de rayon r, est sensi-
ıement égal à $\frac{m}{r}$; on a donc

$$V^2 = \frac{4lC}{r^2}(T)\sin\frac{\alpha}{2}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2};$$

: doit être déterminé à part. A cet effet, on remplace le levier
le la balance par un gros fil cylindrique de cuivre et on le fait
sciller : c'est un pendule composé pour lequel on peut écrire

$$t = \pi\sqrt{\frac{K}{C}}.$$

Or le moment d'inertie du fil K est égal à $\frac{pl^2}{3}$, p étant son
poids, l sa demi-longueur, le tout exprimé en unités C.G.S et
la dyne étant l'unité de force : on en déduit

$$C = \pi^2\frac{pl^2}{3t^2}.$$

Il n'est pas inutile de faire observer au lecteur que l'angle
de torsion est évalué en degrés; il faudra donc multiplier sa
valeur par le facteur $\frac{2\pi}{360}$ pour la réduire en parties du rayon;
le moment du couple C est relatif à l'arc de 57° 17′ 44″,8, c'est-
à-dire à l'arc égal au rayon.

On écrira par conséquent

$$V^2 = \frac{\pi}{45}\frac{Cl}{r^2}(T)\sin\frac{\alpha}{2}\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}.$$

Pour mesurer le potentiel d'une source, on maintient les

([1]) On écrit quelquefois ($t + \alpha$) au lieu de T, t exprimant l'angle dont on
tourné le micromètre supérieur; mais sous cette forme l'équation est moins
nérale, ainsi qu'on le verra par la suite de cette manipulation.

deux boules en communication avec elle, afin d'éviter toute déperdition : le potentiel est dès lors constant.

Nous appliquerons cette méthode à l'étude des phénomènes électrostatiques dans les piles ([1]).

Description.

M. Branly a augmenté la sensibilité de la balance de Coulomb ordinaire, en fixant sur le prolongement du fil un miroir concave dans lequel il observait, à l'aide d'une lunette, l'image réfléchie d'une règle divisée extérieure, selon la méthode de Poggendorff.

La boule mobile, portée par une tige métallique très mince, communiquait par le fil de torsion avec la boule fixe par l'intermédiaire d'un conducteur métallique : les deux sphères étaient reliées de la sorte au pôle positif d'une pile isolée dont l'autre pôle était à la terre, et par conséquent au potentiel zéro.

Les boules peuvent être faites en liège doré : on leur donne exactement le même diamètre, d'environ $0^m,008$ à $0^m,0012$.

Pour fil de torsion on emploie un fil d'argent, de cuivre recuit ou de laiton d'au plus $\frac{1}{15}$ de millimètre de diamètre.

Le conducteur qui relie le pôle de la pile à l'instrument doit être long et fin : on opère sur 50 ou 100 couples zinc-cuivre-eau, de petite dimension, qu'on peut sans difficulté disposer sur la table même où l'on travaille. Pour assurer l'isolement de la pile, on monte les vases en couronne sur un plateau de caoutchouc ou bien on les noie par leur base dans la gomme laque (*fig.* 75).

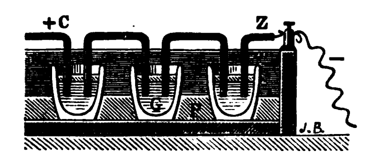
M. Angot a proposé de couler sur une planchette de bois une légère couche de soufre, puis, les vases étant rangés par ordre, de les fixer par de la paraffine ; ce corps, fusible à 60°, est d'un maniement facile, et de plus il jouit de la propriété des corps gras. L'eau ne s'y étale pas, mais elle reste en globules qu'on peut enlever avec une pipette, de sorte que

---

([1]) BRANLY, *Annales de l'École Normale supérieure*, 2e série, t. II, p. 215 ; 1873, et *Traité d'Électricité statique*, par M. Mascart, t. I, p. 390 ; 1876.

les éléments restent isolés, alors même qu'en les montant on aurait laissé tomber un peu de liquide entre eux.

Fig. 75.



La dimension des éléments est indifférente au résultat : on peut la réduire à volonté.

Manuel opératoire.

1° Les constantes de l'instrument sont à déterminer d'abord : on mesurera donc le diamètre des boules et la distance de leur centre au fil de suspension ; la valeur de C se déduira de la durée t des oscillations simples exécutées par un gros fil de cuivre, de longueur l, de poids p, suspendu par son milieu au fil de torsion. On suivra les règles formulées ci-dessus dans la L^e manipulation.

2° Les deux boules de la balance sont alors amenées à environ 0^m,025 l'une de l'autre, sans qu'il y ait torsion du fil : la distance angulaire correspondante est d'environ 15° pour les dimensions moyennes de l'instrument. La position de la boule mobile est soigneusement observée et repérée sur la mire ;

3° La pile ayant été montée à l'eau quelque temps à l'avance, on relie son pôle négatif à la terre par l'intermédiaire des conduites d'eau ou de gaz, et le pôle positif à la balance. Les boules sont repoussées.

4° On tord le fil par le micromètre supérieur d'un angle suffisant pour ramener la boule mobile à sa position première : on y parvient facilement à quelques minutes près, qu'il est toujours nécessaire d'ajouter à la torsion totale T ou d'en retrancher, suivant que la boule est restée au delà ou en deçà de sa position initiale.

5° Les boules ayant été déchargées et le micromètre supé-

rieur ramené dans sa direction première, la boule mobile doit revenir au premier repère.

Résultats.

Cette méthode ne conduit pas à des nombres rigoureusement exacts, parce que les boules sont trop rapprochées pour qu'on puisse négliger leur influence réciproque; en évitant de placer les boules en contact au début de l'expérience, on réduit cette cause d'erreur, mais on ne la supprime pas.

Le calcul suivant, dont les données ont été fournies par une pile zinc-cuivre et eau naturelle de 50 éléments, pourra servir de type aux jeunes physiciens; mais ils ne demanderont pas au résultat final l'exactitude rigoureuse qu'une seule expérience ne peut guère fournir.

1° Détermination de C.

Demi-longueur du fil de cuivre	$2^{cm},7$
Poids	$2^{gr},8$
Durée d'une oscillation	$5^{s},3$

$$C = \frac{\overline{3,1416}^2 . 2,8 . \overline{2,7}^2}{3 . \overline{5,3}^2} = 12,2226.$$

2° Mesures des constantes.

Longueur de l'aiguille, du centre de la sphère à l'axe d'oscillation	10^{cm}
Rayon des boules	$0^{cm},7$

3° Détermination de V.

Angle de torsion totale T	$18°35'$
Distance angulaire α	$14°30'$

L'angle primitif d'écart était moindre que 6' : la torsion est par conséquent égale à 18°41', soit 18°68'.

Nous aurons donc

$$V^2 = \frac{3,1416.10.12,226}{45.\overline{0,72}^2}\ 18,68 \sin 7^\circ 15' \operatorname{tang} 7^\circ 15';$$

$$V = 0,1916.$$

Le potentiel pour un seul élément sera égal à

$$\frac{0,1916}{50} = 0,0038.$$

M. Branly a trouvé par cette méthode 0,00395 en tenant ompte de l'influence réciproque des deux sphères électrisées. 'our le couple zinc-platine-eau

$$V = 0,00438.$$

Ces nombres sont supérieurs à ceux de M. Thomson, bien ue la pile de Volta ait une force électromotrice plus faible ue celle de la pile de Daniell; mais la différence peut être ttribuée à la répulsion qui s'exerce entre les tiges de support es boules.

Un calcul simple permet de déduire de ce qui précède la lesure de la quantité d'électricité transportée dans l'unité de emps dans le circuit d'une pile produisant un courant d'intensité connue, ou consommant un poids de zinc p. En effet, la [uantité d'électricité qui se trouve sur une sphère de rayon r, nise en communication avec le pôle positif de la pile, sera rV en unités absolues. On chargera donc la sphère et on la dé-chargera plusieurs fois de suite à travers un galvanomètre : la quantité d'électricité qui traversera le fil de cet instrument sera, pour n décharges, nrV [1].

---

(1) BRANLY, *loc. cit.*, p. 219.

LIVe MANIPULATION.

MESURE DU TRAVAIL DES FORCES ÉLECTRIQUES.

Théorie.

Lorsqu'on décharge différents conducteurs électrisés en les mettant en communication avec le sol, ils reviennent à l'état neutre en produisant un travail : on peut évaluer l'énergie potentielle du système en mesurant ce travail ou son équivalent, la chaleur dégagée.

La théorie du potentiel permet de démontrer que la chaleur développée par la décharge d'une batterie est, pour un même potentiel, proportionnelle à la surface de la batterie, ou, pour une même charge, en raison inverse de la surface; enfin, qu'elle varie proportionnellement au carré de ce potentiel ou de cette charge.

Ces résultats avaient été trouvés par M. Riess longtemps avant qu'on les eût déduits de la théorie : nous nous proposons de reproduire les remarquables expériences par lesquelles les faits ont été établis [1].

Il est nécessaire que la décharge de la batterie n'effectue aucun travail extérieur et qu'elle n'ait à traverser aucune substance isolante : cependant la résistance du circuit doit être considérable et l'on est obligé d'y introduire un fil fin.

La chaleur dégagée dans le conducteur se mesure à l'aide d'un instrument très sensible, connu sous le nom de *thermomètre électrique* de Riess.

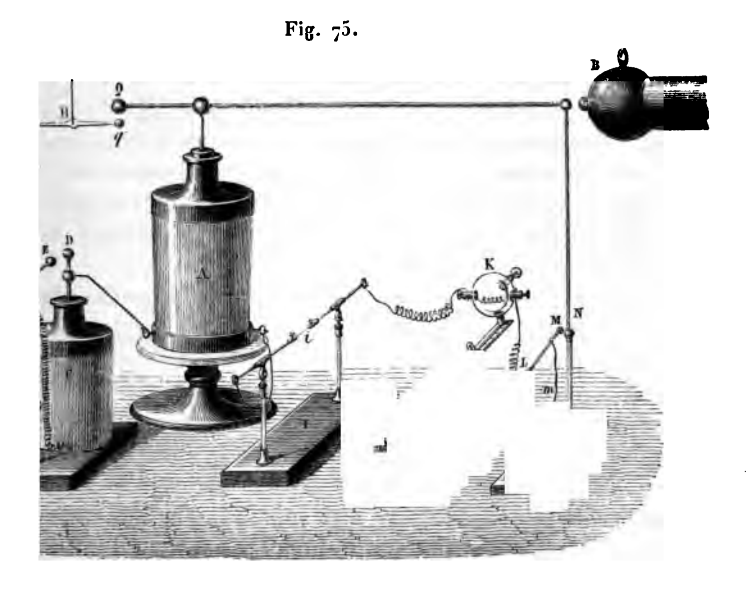
---

(1) Cf. Riess, *Annales de Poggendorff*, t. XL; Verdet, *Théorie mécanique de la chaleur*, t. II, p. 108; Jamin et Bouty, *Cours de Physique de l'École Polytechnique*, t. I, 3e fasc., p. 259, 3e édition.

Description.

ıermomètre, représenté (*fig.* 75) en K, n'est pas sans
ie avec le calorimètre de Favre et Silbermann : on me-
chaleur dégagée par les variations de pression d'une
d'air renfermée dans un ballon de verre. La décharge

Fig. 75.



ue à travers une spirale de platine : un manomètre à
tube incliné, permet d'évaluer la chaleur Q par la for-

$$Q = K(MC + mc)\,l \sin\omega,$$

quelle M et m sont les masses d'air et de platine, C et
chaleurs spécifiques, l le déplacement de la colonne
et ω l'inclinaison du tube sur l'horizon. Ce calcul est
mais généralement inutile, car Q est proportionnel à l,
ιe les conditions de l'expérience restent les mêmes.
par l'électromètre de Lane que se mesurent les quan-
'électricité accumulées sur la batterie : cet instrument

est une bouteille de Leyde dont les armatures communiquent avec deux boules métalliques de décharge, susceptibles d'être rapprochées plus ou moins l'une de l'autre à l'aide d'une vis micrométrique. Une étincelle jaillit entre les deux boules dès que le potentiel de l'armature intérieure acquiert une valeur déterminée. L'unité de mesure est proportionnelle à la capacité de la bouteille et elle dépend de la distance explosive : elle varie aussi avec la résistance du conducteur qui joint l'armature extérieure et la boule de décharge. Il faut veiller à ce que la communication entre la tige et l'armature intérieure soit toujours parfaite : M. Mascart donne la préférence aux bouteilles à goulot large, dans l'intérieur desquelles on peut coller des bandes d'étain; quelques tiges de laiton arc-boutées contre la paroi assurent alors une communication certaine entre le conducteur central et l'armature. L'usage du clinquant est moins bon, car les contacts se détruisent par volatilisation au bout d'un temps très court.

Pour évaluer la charge d'une batterie A isolée, on met la source B en communication avec son armature intérieure; d'autre part, son armature extérieure est reliée à l'armature intérieure d'une bouteille de Lane G, posée sur le sol, de manière à déverser dans le réservoir commun l'électricité repoussée par A. Dans ces conditions la quantité d'électricité qui s'écoule à chaque étincelle est toujours la même et la charge de la batterie peut être mesurée par le nombre même des étincelles qui ont jailli entre les boules : l'influence des résidus est éliminée par la répétition des expériences.

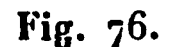
Voici comment M. Riess disposait ses expériences : l'extérieur de la batterie était relié à la source par l'intermédiaire d'un excitateur universel I dans lequel était intercalée une résistance i variable à volonté; le fluide mis en mouvement traversait enfin le thermomètre électrique K et un déchargeur composé d'une tige LM qu'on faisait tomber en la tirant par un cordon de soie m sur le conducteur N qui communique avec la machine électrique B.

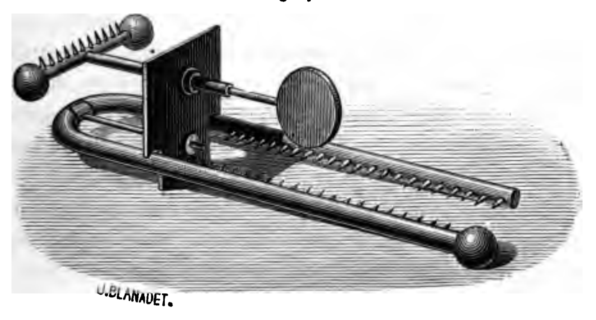
Il convient de se servir de la machine de Holtz, qui donne beaucoup plus d'électricité que les anciennes machines et dont les deux pôles fournissent les deux fluides : le modèle à deux rotations inverses débite une plus grande quantité d'électri-

ité que le modèle ordinaire, attendu que quatre peignes sont limentés par une rotation relative double des plateaux. M. Baille a reconnu que le signe de l'électricité est indifférent : cependant il est plus commode d'employer l'électricité négative, qui ne donne pas d'aigrettes et de pointes comme la positive [1].

---

[1] La machine de Holtz est un instrument très délicat, qu'il n'est pas aisé de mettre en activité. Extrêmement sensible à l'humidité atmosphérique, elle s'amorce quelquefois très difficilement, alors même qu'on aurait disposé longtemps à l'avance, sous la table qui la supporte, un réchaud garni de braise de charbon de bois. Les poussières folles qui flottent dans l'air peuvent aussi mettre la machine hors d'usage : aussi conseillerons-nous d'en laver de temps à autre les plateaux avec un linge neuf, légèrement imbibé d'huile de pétrole. La lame d'ébonite par laquelle on charge la machine doit être l'objet d'une grande attention : si l'on ne peut pas l'électriser par frottement au point d'en tirer avec le doigt des étincelles de quelques millimètres, on est exposé à de


Fig. 76.



longues et stériles tentatives, et quelquefois on se voit obligé de recourir aux machines de frottement. Toutefois un appareil très ingénieux, imaginé par le P. Villaume, permet d'atteindre le résultat voulu avec un simple bâton de résine : c'est un conducteur plat isolé terminé par un peigne (*fig.* 76) qu'on attache sur les mâchoires de la machine en face des armures de papier; le dessin ci-contre le représente placé sur les mâchoires, mais les plateaux de verre entre lesquels il est engagé ont été supprimés. Il suffit d'approcher le bâton électrisé du peigne pour charger le papier par l'influence du conducteur plat : je recommande aux physiciens ce petit dispositif, aussi efficace que peu dispendieux.

Faisons observer encore que, pour la mise en train de la machine, il est indispensable de mettre d'abord les deux pôles au contact, en faisant tourner le plateau dans une direction opposée à celle des pointes de papier. Un bruissement particulier indique le fonctionnement de l'appareil : il faut alors une vitesse d'au moins cinq tours à la seconde.

On expérimente sur une batterie ou sur une cascade; dans ce dernier cas, on peut écarter beaucoup les contacts du déchargeur, parce qu'il est possible d'établir sur les armatures extrêmes d'une batterie en cascade une grande différence de potentiel sans que la batterie se décharge d'elle-même ou se brise; en employant une batterie ordinaire, il y a au contraire quelque danger à établir une trop grande différence de potentiel entre ses armatures.

L'électromètre à poids H, placé sous le conducteur Q, permet de vérifier que le potentiel V est proportionnel au quotient de la quantité M d'électricité accumulée sur l'armature de la batterie par sa surface S; en effet, l'expérience montre que $\frac{M}{S}$ est proportionnel à $\sqrt{p}$, p étant le poids qui fait équilibre à la force répulsive exercée entre les boules Q et q.

Manuel opératoire.

1° Toutes choses étant disposées de la manière qu'indique la *fig.* 74, on charge la batterie par la machine de Holtz et, en même temps que l'observateur compte le nombre d'étincelles à l'électromètre de Lane, un aide relève exactement la hauteur du liquide dans le thermomètre électrique.

2° La charge ayant atteint la limite qu'on s'est assignée, on effectue la décharge en abaissant le fléau LM : le liquide baisse de l dans le thermomètre.

3° On fait varier la charge de la batterie, le nombre des bouteilles dont elle se compose et la résistance du fil de l'excitateur et du thermomètre, et l'on répète l'expérience précédente dans ces conditions nouvelles.

Résultats.

Le Tableau ci-dessous, emprunté à M. Riess, démontre que la chaleur dégagée en un point du circuit est en raison directe du carré de la charge de la batterie et en raison inverse du nombre des bouteilles.

Les bouteilles employées avaient $0^{mq},16$ de surface; la distance explosive de l'électromètre était égale à $2^{mm},25$.

Échauffement.

Charges.	Bouteilles 2.	4.	6.
2	1,5	»	»
4	6,7	3,2	2,6
6	13,4	7,3	5,5

L'accord de ces chiffres avec la loi est satisfaisant.

Quand on modifie la résistance du fil du thermomètre, on onstate que la chaleur dégagée varie en raison inverse de la uatrième puissance du diamètre du fil, toutes choses égales 'ailleurs. Afin de rendre comparables ces expériences, exécu-:es dans des conditions si diverses, il faut nécessairement ue le circuit total ne change pas : M. Riess prenait à cet effet eux fils de platine qu'il plaçait d'abord l'un en k, l'autre en i; is, une première détermination étant faite, il les changeait e place et il procédait à une seconde expérience, après avoir ndu à la batterie la même charge que précédemment.

Avec une batterie en cascade, on observe que, pour une arge donnée, l'énergie est plus grande que celle d'une seule outeille; mais, pour un potentiel donné, elle est moindre : 'est le contraire de ce qui a lieu pour une batterie en sur-ice. Avec une source d'électricité, c'est-à-dire à potentiel onstant, la batterie en cascade n'est donc pas avantageuse, i toutefois les bouteilles peuvent supporter la différence de otentiel maximum de cette source.

LVe MANIPULATION.

MESURE DES CAPACITÉS ÉLECTRIQUES ET DE LA FORCE CONDENSANTE.

Théorie.

La capacité électrique d'un conducteur dépend non seulement de sa forme, mais encore de la forme et de la position le tous ceux qui l'entourent : ce n'est donc point, comme la

capacité calorifique avec laquelle elle présente de nombreuses analogies, une constante fixe pour un corps considéré. Cette remarque est de la plus haute importance : l'influence des corps environnants et des murs de la salle dans laquelle on opère n'est donc jamais négligeable. Cependant nous ne tiendrons pas compte de cette cause d'erreur au début de cette étude.

L'électromètre de M. Branly permet de déterminer très simplement la capacité d'un conducteur. La méthode consiste à suspendre une aiguille au potentiel V entre quatre secteurs réunis en croix deux à deux et possédant des charges égales, mais de signes contraires : l'aiguille est déviée d'un angle δ_0. Appelant E sa capacité et Q sa charge, nous pouvons écrire

$$Q = VE = K\delta_0.$$

Pour mesurer E, chargeons une sphère de rayon R (donc de capacité R), de manière à l'amener au même niveau de potentiel V; puis, mettons-la en communication lointaine avec l'aiguille préalablement déchargée et ramenée au zéro. La sphère et l'aiguille se mettent au même niveau de potentiel V_1 et l'on observe une déviation δ_1.

On a, en exprimant que la sphère perd ce que l'aiguille gagne,

$$(V - V_1)R = V_1E = K\delta_1,$$

d'où

$$K\delta_1 = \frac{VRE}{R + E},$$

et finalement

$$E = R\frac{\delta_0 - \delta_1}{\delta_1}.$$

Connaissant E, on emploie la même méthode pour déterminer la capacité C d'un conducteur quelconque : δ_2 étant la déviation correspondante à δ_1, on peut donc écrire comme ci-dessus :

$$VE = K\delta_0,$$

$$(V - V_2)C = V_2E = K\delta_2,$$

$$K\delta_2 = \frac{VCE}{E + C}$$

et

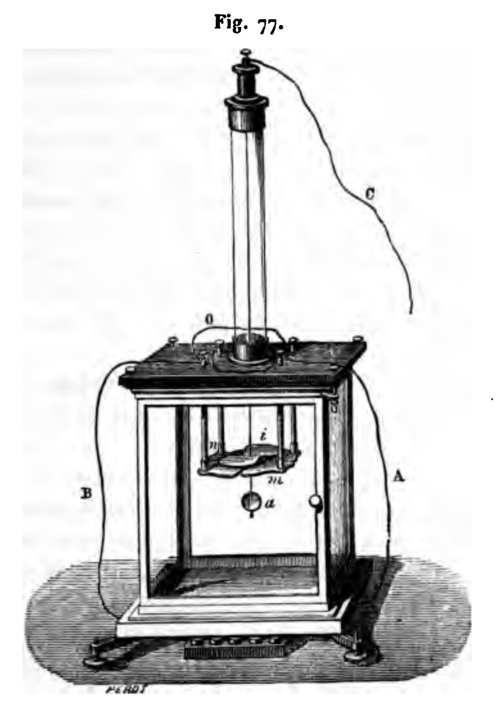
$$C = E \frac{\delta_2}{\delta_2 - \delta_0}.$$

Ce procédé est dû à M. Angot (1).

Description.

L'électromètre de M. Branly (1) est une forme simplifiée de l'électromètre à quadrant de M. Thomson : il est représenté *fig.* 77, tel que le construit M. Bourbouze.

Fig. 77.



Quatre secteurs plats, *m* et *n*, remplacent les quadrants creux : une aiguille d'aluminium très légère, en forme de 8,

(1) *Annales de l'École Normale supérieure*, 2e série, t. III, p. 268; 1874.
(2) *Ibid.*, 2e série, t. II, p. 215; 1873.

est suspendue au-dessus par un fil d'argent. Un miroir *a* est rattaché à l'aiguille par une petite tige verticale : le tout est renfermé dans une cage carrée en glaces, surmontée d'un tube de verre, sur lequel s'adapte le tambour qui porte le fil de torsion.

Pour les expériences, on réunit les secteurs deux à deux en diagonale et on leur donne des charges égales et de signes contraires, en faisant communiquer chaque paire avec le pôle d'une pile isolée parfaitement constante : quant à l'aiguille, elle est reliée par le fil C avec le corps que l'on étudie. Les déviations se mesurent par la méthode de la réflexion : le miroir *a* est concave et la règle divisée est placée en son centre de courbure, ce qui donne une image réfléchie très nette, qu'on reçoit sur une échelle micrométrique en verre. Ce micromètre peut même être fixé sur la cage, si l'on veut soustraire l'image aux influences perturbatrices des glaces.

Pour amortir les oscillations de l'aiguille, M. Angot fixe au-dessous du miroir une petite lame de platine, qu'il fait plonger dans l'acide sulfurique : elle doit être entièrement immergée, sinon il se formerait le long de la ligne de contact un ménisque qui changerait de forme pendant le mouvement et pourrait entraîner l'aiguille. La présence de l'acide a en outre l'avantage de dessécher l'air de la cage.

La pile employée pour la charge est formée de petits éléments zinc-cuivre-eau ou zinc-platine-eau qu'on réunit en série au nombre de 50 ou de 100 éléments : une pile de 100 éléments forme un carré de $0^{m},300$ de côté environ ; on peut la disposer en dessous de l'électromètre, comme l'indique la figure.

Chaque godet contient au plus 5^{gr} d'eau : pour éviter l'évaporation, on verse à la surface une légère couche d'huile, et dans ces conditions une pile peut fonctionner plusieurs mois sans qu'il soit nécessaire d'y toucher. Mais son potentiel n'est point comparable à celui que fournit le *replenisher* de l'électromètre de Thomson et il n'est point aussi constant, car il subit l'influence du temps et de la température. Toutefois il est juste de reconnaître que ces variations sont absolument négligeables dans une série d'expériences comparatives telles que celles qui ont pour objet de mesurer des différences de potentiel ou des capacités électriques.

En changeant le fil de torsion et en élevant ou abaissant l'aiguille, on modifie la sensibilité de l'électromètre de M. Branly : ces éléments seront donc maintenus invariables dans le cours d'une expérience.

Manuel opératoire.

1° Il faut d'abord s'assurer du fonctionnement régulier de l'électromètre : l'aiguille doit se tenir en équilibre sous l'action des secteurs chargés sans torsion; elle ne déviera donc pas quand on reliera les secteurs au sol.

2° Les secteurs étant chargés, on rattache l'aiguille au pôle positif d'une pile constante, et on inscrit la déviation δ_0. On n'est pas obligé d'attendre l'extinction complète des oscillations et l'on se contente généralement de déterminer la position d'équilibre par trois mesures convenablement associées; α étant le premier écart maximum à droite, β le premier à gauche, γ le second à droite, on a

$$\delta_0 = \frac{\alpha + 2\beta + \gamma}{4}.$$

3° On détermine de même δ_1 après avoir déchargé l'aiguille, chargé une sphère isolée de rayon R et mis l'aiguille en communication avec elle : conformément à ce qui a été expliqué ci-dessus, on en déduit E.

4° Par un procédé analogue, on relève une déviation δ_2, correspondante au potentiel commun de l'aiguille et du corps soumis à l'expérience, le corps ayant seul été chargé par la pile.

Le calcul indiqué précédemment conduit à la détermination de C.

Résultats.

La capacité électrique de l'aiguille de M. Angot a été trouvée égale à 43,2, c'est-à-dire que cette aiguille se charge comme une sphère de $0^m,432$ de rayon.

Des cylindres de carton, recouverts de papier d'[...] sentèrent les capacités suivantes :

CYLINDRES.		
Hauteur.	Rayon de base.	CAPACITÉS.
cm 5	cm 5	4,60
1	10	5,84
20	20	7,88
40	40	11,36
80	80	16,72

Mais ces valeurs de C ne sont que les capacités [...] des cylindres, c'est-à-dire les capacités vraies mo[...] l'influence de tous les corps environnants. On n[...] mesurer exactement cette influence, qui entraîne [...] d'au moins $\frac{1}{20}$ de la valeur vraie. Pour la rendre a[...] que possible, on suspend les conducteurs par un fil [...] milieu de la pièce, le plus loin possible de tout aut[...] teur : la salle dans laquelle on exécute ces expéri[...] présenter au moins 10^m de côté et elle augmente a[...] la capacité des corps de $\frac{1}{100}$.

M. Angot a mesuré la capacité de condensateurs à [...] formés de deux plateaux d'électroscopes, mainte[...] distance quelconque par des cales de verre dont [...] avait été mesurée au sphéromètre. La marche de l'[...] était celle que nous avons décrite.

Plateaux de $9^{cm},15$ *de rayon.*

Épaisseur d'air *e*.	Capacité C.
mm 0,814	290,0
1,104	217,0
1,803	135,0
2,781	92,8
10, 63	29,0
24, 21	18,7

Ces chiffres ne peuvent pas être rapprochés de [...] quels on est conduit par l'application de la formu[...] de Clausius, parce que, d'une part, l'épaisseur du [...]

otable par rapport à son rayon, et que, d'autre part, l'in-uence des corps voisins ne peut être éliminée des résultats ruts de l'expérience. Mais ces résultats de M. Angot ne erdent rien de leur intérêt, car ils permettent de calculer la orce condensante de ce condensateur pour une épaisseur lonnée.

En effet, les capacités peuvent être représentées par la fornule empirique

$$e(C - 6,80) = 23,75,$$

ce qui donne

$$= \frac{23,75}{e} + 6,80.$$

Pour $e = \infty$, $C = 6,80$; c'est la capacité du collecteur tout seul. Si l'on veut donc avoir la force condensante, il faut diviser la capacité correspondante par 6,80, car la force condensante est le rapport des capacités du collecteur quand il fait partie du condensateur et quand il est seul.

CHAPITRE XI.

ÉLECTRICITÉ VOLTAÏQUE

ET

ÉLECTROMAGNÉTISME.

Note sur les unités électromagnétiques C.G.S.

Les grandeurs électriques dont on a surtout à s'occuper sont au nombre de cinq : la *quantité* Q, la *force électromotrice* ou différence de potentiel E, l'*intensité* I, la *résistance* R et la *capacité* C.

Ces grandeurs sont liées entre elles par cinq relations :

I.	Loi de Ohm.................	$I = \frac{E}{R}$
II.	Loi des intensités...........	$Q = It$
III.	Loi des capacités............	$Q = CE$
IV.	Loi de Joule................	$W = I^2Rt = EIt$

La cinquième, due à Laplace, exprime la force qui s'exerce entre un courant et un aimant suivant la loi fondamentale de l'électromagnétisme; $F = K\frac{LMI}{a^2}$, a étant la distance qui sépare le pôle de l'élément du courant. Ces cinq relations permettent de définir toutes les unités en fonction de l'une d'entre elles et de l'unité de travail. Prenons pour base, par exemple, l'unité d'intensité de courant.

Voici comment nous choisirons cette unité. Soit en M (*fig.* 78) une quantité de magnétisme égale à 1 dans le système C.G.S., c'est-à-dire repoussant avec la force d'une dyne une quantité égale située à $0^m,01$ de distance. Concevons en

AB un circuit ayant $0^m,01$ de longueur et dont tous les points soient situés à $0^m,01$ de M. Un courant traversant AB exercera sur le pôle une force qui tendra à le déplacer perpendiculairement au plan du papier; convenons de prendre pour unité d'intensité celle du courant qui exercerait une force égale à une dyne.

Fig. 78.

Or, l'intensité est définie par la quantité d'électricité qui traverse une section du conducteur pendant l'unité de temps; l'unité de quantité est donc déterminée par ce qui précède. De plus, si le courant ne produit pas d'autre travail que l'échauffement du circuit, la loi de Joule donne la résistance, et par suite cette unité; il n'y a qu'à mesurer l'énergie calorifique recueillie pendant le temps t. Enfin, la force électromotrice est donnée par l'équation $W = EIt$, et la capacité est égale à $\frac{Q}{E}$; nous sommes donc conduits à un système complet d'unités, dérivé des unités mécaniques C.G.S.

Ce système est théoriquement parfait : pratiquement il a un défaut.

Les unités de résistance et de force électromotrice sont extrêmement petites; les unités de quantité, d'intensité et de capacité sont très grandes, de telle sorte que pour l'usage courant il a fallu créer des noms pour désigner des multiples des premières, des fractions des secondes; on a établi ainsi des unités pratiques dont le maniement est plus facile.

L'unité de résistance a été prise égale à 10^9 unités absolues C.G.S. de résistance et on l'a appelée *ohm*.

Le *volt* est l'unité de force électromotrice égale à 10^8 unités C.G.S de force électromotrice.

On a donné le nom d'*ampère* au courant produit par la force électromotrice d'un volt dans le circuit ayant un ohm de résistance; l'ampère vaut 10^{-1} unités C.G.S d'intensité.

La quantité d'électricité, qui dans une seconde traverse la section d'un conducteur parcouru par un courant d'un ampère est un *coulomb;* cette unité vaut 10^{-1} unités C.G.S. de quantité.

Enfin on a réservé le nom de *farad* à la capacité d'un con-

densateur que 1 coulomb charge à une différence de potentiel égale à 1 volt, ou dont les armatures prennent une différence de potentiel d'un volt quand la charge est d'un coulomb; le farad vaut 10^{-9} unités C.G.S. de capacité.

Dans certaines applications il est utile d'exprimer les différentes grandeurs à l'aide d'unités qui soient un million de fois plus petites ou plus grandes que l'unité pratique correspondante. On a désigné ces nouvelles unités par le même nom, précédé du préfixe *méga* ou *micro*, suivant qu'elles sont des multiples ou des sous-multiples par un million. Ainsi le *mégohm* vaut 10^6 ohms et le *microhm* 10^{-6} ohms.

Le choix des unités pratiques a été rationnel, car il a eu pour objet de les rapprocher des unités adoptées autrefois : l'*ohm* vaut 1,0475 *siemens*, car c'est la résistance d'une colonne de mercure pur de 1^{mmq} de section et d'environ 1^{m},0475 de longueur. Le volt est à peu près la force électromotrice du daniell ordinaire. Il faut faire passer 96 coulombs d'électricité dans un voltamètre pour décomposer 0^{gr},009 d'eau et produire 0^{gr},001 d'hydrogène : on peut encore dire qu'il faut 96 ampères pour décomposer en une seconde un équivalent d'eau exprimé en milligrammes.

L'ampère convient pour les courants qui donnent la lumière électrique et qui servent à transmettre la force; pour les télégraphistes, au contraire, on a dénommé la millième partie de l'ampère sous le nom de *milliampère:* il faut 15 milliampères pour actionner un récepteur Morse.

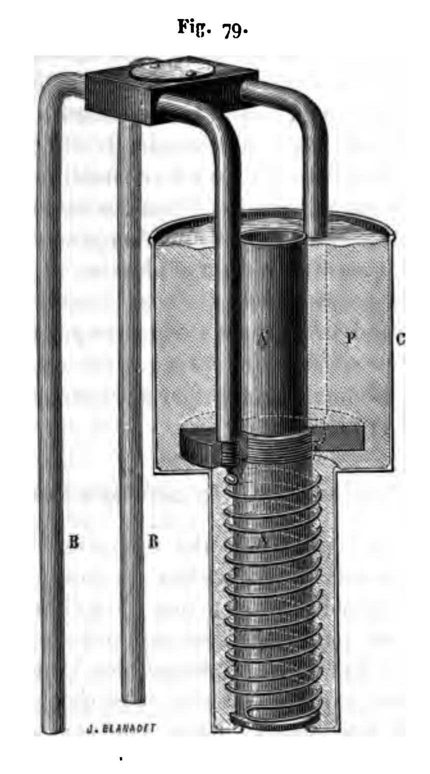
Le Tableau suivant résume toutes les indications de cette Note et donne de plus dans sa dernière colonne les dimensions des diverses unités.

Unités.	Unités pratiques.	Unités C. G. S.	Dimensions.
R.	Ohm	10^9	LT^{-1}
E.	Volt	10^8	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-2}$
I.	Ampère	10^{-1}	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}T^{-1}$
Q.	Coulomb	10^{-1}	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}$
C.	Farad	10^{-9}	$L^{-1}T^2$

La détermination exacte de ces grandeurs par les instruments absolus est une opération délicate qu'on n'exécute

guère que pour la mesure des courants par la boussole des tangentes ou par l'électrodynamomètre : pour les autres grandeurs, on établit des étalons matériels afin de ramener leur mesure à une simple comparaison entre grandeurs de la même espèce. Le Comité de l'Association britannique a con-

Fig. 79.



struit l'ohm : une bobine étalon est conservée à Kew et des copies en ont été livrées au commerce sous la forme représentée par la *fig.* 79; c'est une bobine dont les extrémités sont soudées à des tiges B de gros diamètre que l'on plonge dans des godets de mercure. Des condensateurs ayant une capacité égale au microfarad ont été aussi réalisés sur le modèle des sphères concentriques de Faraday; enfin l'élément Daniell, chargé avec des liquides de composition donnée, produit une

force électromotrice très voisine du volt et peut servir provisoirement d'étalon.

Il faut se garder de confondre ces unités électromagnétiques avec les unités électrostatiques que nous avons exposées précédemment; les expressions identiques de potentiel, de force électromotrice et de capacité pourraient en imposer aux jeunes physiciens. Cependant aucune méprise n'est possible, surtout quand on aborde les unités pratiques, attendu que les volts, les ohms, les ampères, les farads et les coulombs sont des unités relatives aux courants : ces noms n'auraient aucune signification dans le système statique. L'uité de quantité pourrait peut-être seule donner lieu à un malentendu : c'est pourquoi nous jugeons nécessaire d'insister et de signaler au lecteur que le coulomb est 3.10^{10} fois plus grand que l'unité électrostatique de quantité définie ci-dessus. Si nous comparons les dimensions des unités de quantité dans les deux systèmes, nous voyons que leur rapport s'exprime par une vitesse dont on a pu obtenir expérimentalement la valeur numérique égale à trois cent millions de mètres par seconde, c'est-à-dire égale à la vitesse de la lumière.

Instructions pour le montage des piles.

Le montage des piles est une opération importante à laquelle les élèves de nos Facultés ne sont généralement pas suffisamment exercés : nous avons cru nécessaire de condenser en quelques pages les renseignements pratiques qu'on chercherait en vain dans la plupart des Traités de Physique.

L'eau acidulée par l'acide sulfurique, qui joue presque toujours le rôle de liquide excitateur, peut être employée au $\frac{1}{12}$ et même au $\frac{1}{10}$, mais un mélange de 1^{vol} d'acide et de 20^{vol} d'eau, dont la densité est égale à 1,06, suffit pour l'usage ordinaire,

D'après M. d'Arsonval (1), le meilleur liquide pour les éléments Bunsen serait le suivant :

	vol
Eau	20
SO^3,HO	1
HCl	1

(1) *L'Électricien*, 15 janvier 1882.

Le même physicien a indiqué un moyen très simple de purifier l'acide du commerce et de le rendre utilisable dans les piles : on sait en effet que l'acide préparé avec les pyrites ne convient nullement et qu'on était obligé jusqu'ici d'employer de l'acide au soufre. Or il suffirait de verser 5^cc d'huile à brûler par litre d'acide du commerce pour former de l'acide sulfoglycérique et des savons insolubles qui se précipitent en entraînant les métaux étrangers, arsenic, plomb et fer ; l'acide ainsi purifié est entièrement inactif, tant que le circuit est ouvert. Grâce à la présence des acides gras, l'amalgamation du zinc se fait plus rapidement, et les zincs ne laissent plus échapper le mercure en gouttelettes, comme dans l'acide ordinaire.

Quelques précautions sont à prendre quand on verse l'acide dans l'eau : il est prudent de le faire couler par un mince filet et d'agiter le mélange simultanément.

L'acide sulfurique peut être remplacé avantageusement dans le liquide excitateur de toutes les piles en général : le sulfate de zinc donne une constance plus grande, mais une force électromotrice un peu moindre ; l'eau pure augmente considérablement la résistance et diminue par suite l'intensité du courant ; mais elle est adoptée sur plusieurs lignes télégraphiques et son emploi est à conseiller pour certaines expériences électrométriques, parce qu'il donne des éléments très constants.

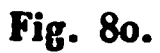
La solution de sulfate de zinc doit marquer 18° Baumé : elle peut servir jusqu'à 40°. A ce moment, il convient d'en enlever une partie et de la remplacer par de l'eau pure. En mêlant ce liquide à $\frac{1}{10}$ de son volume d'une solution saturée de sel ammoniac, on obtient un courant plus intense.

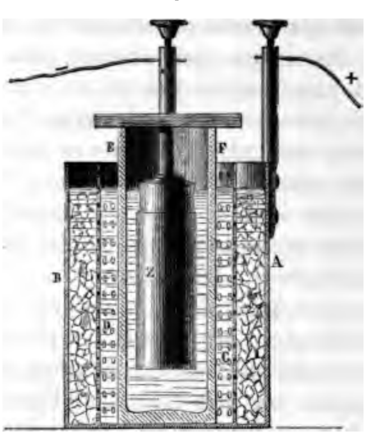
Une pile de Daniell ne perd pas $\frac{1}{11}$ de sa force électromotrice tant que la dissolution du sulfate de cuivre reste colorée.

Le liquide dépolarisateur de cette pile s'obtient en saturant l'eau à froid par 300^gr de sulfate de cuivre par litre.

Une des meilleures dispositions que l'on puisse adopter pour la pile de Daniell est représentée par la *fig.* 80. AB est un vase de cuivre divisé en deux par une cloison percée de trous ; Z est un cylindre de zinc. Les cristaux de sulfate de cuivre sont renfermés dans l'espace annulaire compris entre la paroi et la cloison.

L'acide azotique destiné aux piles de Bunsen et de Grove doit être concentré, sinon la dépolarisation ne se fait pas bien, au grand préjudice de la constance de ces éléments : l'acide concentré a une densité égale à 1,33.


Fig. 80.



M. d'Arsonval donne la composition suivante du liquide dépolarisateur :

	vol
AzO^5, HO ordinaire	1
HCl	1
Eau acidulée au $\frac{1}{20}$ par SO^3, HO	1

M. Bunsen a indiqué pour la pile au bichromate de potasse les proportions suivantes :

Bichromate cristallisé	92gr
SO^3, HO	94cc

On mélange et l'on broie jusqu'à former une bouillie épaisse qu'on additionne de 900gr d'eau, de manière à obtenir une complète dissolution.

Pour amalgamer un zinc, il faut le plonger pendant quelques instants dans de l'eau mêlée de $\frac{1}{16}$ d'acide sulfurique en volume, puis le frotter avec une brosse de fils de cuivre imprégnés de mercure.

Quand la disposition de la pile le permet, on laisse un peu de mercure au fond des vases, de façon que le zinc soit baigné par ce liquide : l'amalgamation se fait d'elle-même sous l'influence du courant.

La surface d'un zinc amalgamé doit être brillante et sans taches : on obtient ce résultat en étendant le mercure à l'aide d'un chiffon.

L'opération finie, on lave le zinc à grande eau et on le fait égoutter dans un cadre de bois pour recueillir le mercure qui s'écoule de sa surface.

Le chlorure de mercure en dissolution peut être employé avantageusement pour le travail de l'amalgamation.

Les charbons des piles Bunsen ont besoin d'être rafraîchis après un certain temps : on en renouvelle la surface à la lime, puis on les chauffe fortement.

Les vases poreux sont faits en terre blanche de Montereau : c'est la partie des piles la plus délicate et toujours la plus défectueuse; on ne peut être sûr de la qualité de la terre qu'après l'avoir éprouvée. Le meilleur moyen d'essayer ces vases sans les employer consiste à les emplir d'eau et à les abandonner pendant une heure; après ce temps, si le vase est bon, l'eau doit se montrer également sur toute la surface extérieure en gouttelettes, mais ne doit pas couler.

Pour empêcher autant que possible la formation des sels grimpants, on vernit les vases poreux à la partie supérieure, et on les enduit de cire ou de paraffine sur une hauteur de $0^m,02$ à $0^m,03$. On assure la durée des vases poreux [1] en coulant au fond une pâte claire formée de trois parties de résine et une de gomme-laque en dissolution dans l'alcool.

De temps en temps il est nécessaire de gratter la surface des vases poreux et de les laisser séjourner huit jours dans l'eau.

Quand on veut platiner une lame de platine ou d'argent, on met un peu de bichlorure de platine dans de l'eau acidulée, et l'on décompose la solution au moyen d'un conducteur de platine fixé au pôle positif d'une pile, dont le pôle négatif communique avec la lame à platiner. On obtient de la sorte

---

[1] A. Callaud, *Essai sur les piles.*

un dépôt qui présente de petites aspérités sur lesquelles l'hydrogène se dégage facilement comme dans la pile de Smée.

Voici, d'après M. Duboscq ([2]), la meilleure manière de monter rapidement une pile puissante :

Les vases extérieurs de terre sont disposés d'avance sur une table en deux rangées parallèles : il est bon de ne pas forme plus de deux lignes, afin que les éléments restent toujours la portée de la main et qu'on puisse rapidement remplace l'un d'eux s'il se comporte mal. Les vases sont remplis a préalable d'eau acidulée; ils sont posés sur une table recou verte d'une plaque de verre, de porcelaine ou de carton d'a miante : on veillera à ce qu'il n'y ait pas de liquide répand sur les tables, afin que les éléments restent parfaitement is lés les uns des autres. Les vases poreux, contenant le charbc et l'acide azotique, sont placés, dans les intervalles des opér tions, dans une cuve de grès remplie d'acide azotique et ferm par un couvercle à joints hermétiques.

Au moment de monter la pile, on commence par s'assur que toutes les pinces, les lames de cuivre et les serre-joint sont bien propres; il est bon de les conserver dans un po plein d'eau fortement chargée de soude commune. Puis, o met dans chaque vase de terre contenant déjà de l'eau acidulée un zinc amalgamé, et l'on retire de la cuve les vases poreux qu'on place au milieu des éléments; il reste à faire les communications. M. Duboscq avait formé des ouvriers qu montaient une pile en moins d'une demi-heure au Grand-Opéra.

Quand on démonte la pile, il faut rincer les zincs à l'eau pure et les sécher; les charbons et les vases poreux sont réintroduits dans l'acide azotique.

L'acide azotique ne peut guère servir plus de deux ou trois heures, et il doit être renouvelé par moitié après chaque séance : on trouve à le revendre. Quant à l'eau acidulée, on la jette pour en employer chaque fois de nouvelle.

Les meilleures pinces d'assemblage sont celles que représente la *fig.* 81, qui a été dessinée à grande échelle pour fair

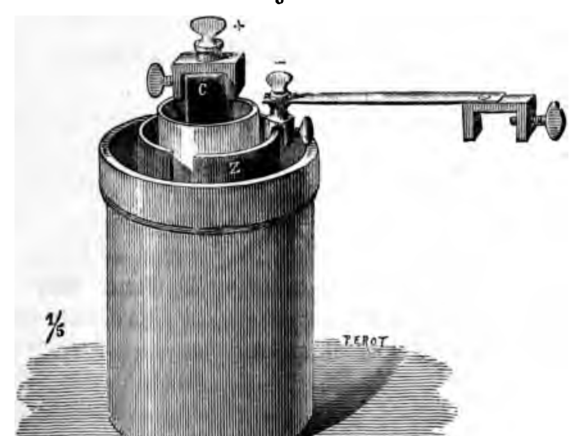
---

([1]) A. Cazin et Angot, *Traité théorique et pratique des Piles électrique*: 1881, p. 218.

saisir tous les détails de l'élément Bunsen tel qu'on le construit en France.

Quand un courant de quantité traverse un conducteur de faible résistance, il y a lieu de surveiller attentivement l'état des électrodes, leur grandeur, leur écartement, le degré de concentration des liquides, leur conductibilité et la bonne

Fig. 81.



exécution des contacts. Ces divers éléments auraient au contraire une influence très faible dans une pile montée en série et reliée à un conducteur très résistant.

L'association des éléments d'une pile présente quelques difficultés dont nous trouvons une solution complète dans l'excellent Traité de Cazin ([1]).

Deux problèmes peuvent se poser dans la pratique :

I. *On donne un nombre* $N = mn$ *d'éléments identiques et une résistance extérieure* R *que le courant doit vaincre. On connaît d'abord la force électromotrice* E *et la résistance* r *de chaque élément; on se propose de trouver le meilleur mode*

([1]) *Loc. cit.*, p. 27, et GORDON, *Traité expérimental d'Électricité et de Magnétisme*, I, p. 559.

d'arrangement de ces éléments, c'est-à-dire celui qui donnera le maximum d'intensité.

On doit avoir

$$\frac{nr}{m} = \mathrm{R}.$$

Exemple numérique. — Considérons $48^{\text{él}}$ Bunsen ordinaires, pour lesquels $\mathrm{E} = 1^{\text{volt}},96$ et $r = 0^{\text{ohm}},25$; soit de plus $\mathrm{R} = 3$ ohms :

$$\frac{n}{m} = \frac{3}{0,25} = 12,$$

$$\mathrm{N} = mn = 48,$$

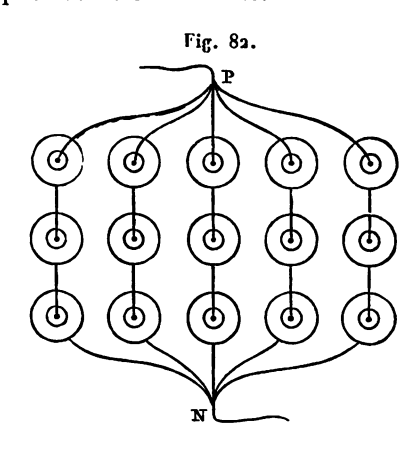
$$m = 2,$$

$$n = 24,$$

$$= \frac{mn\mathrm{E}}{+ m\mathrm{R}} = 7^{\text{amp}},84.$$

La meilleure disposition consiste à réunir entre eux les pôles extrêmes des m séries; la *fig.* 82 représente un assemblage de cinq séries de 3 éléments.

Fig. 82.



II. *On veut avoir un courant d'une intensité donnée* I *à l'aide d'une pile dont chaque élément possède une force électromotrice* E *et une résistance* r, *le circuit extérieur ayant une résistance* R; *quel est le minimum d'éléments qu'il faut employer et comment les disposer?*

S'il y a des valeurs entières satisfaisant aux équations

$$\frac{n}{m} = \frac{R}{r}$$

et

$$I = \frac{mE}{2r} = \frac{nE}{2R},$$

ces valeurs sont la réponse cherchée.

Exemple numérique. — On veut 10 ampères dans une résistance extérieure d'un demi-ohm :

$$n = \frac{2RI}{E} = 5,1,$$

$$m = n\frac{r}{R} = 5,1\,\frac{0,25}{0,50} = 2,55.$$

Prenant $n = 5$ et $m = 3$, on aura

$$I = 10^{\text{amp}},7.$$

Pour avoir exactement l'intensité demandée, il faudrait ajouter au circuit un rhéostat pour augmenter convenablement la résistance.

En terminant ces instructions, je crois devoir faire observer que généralement il n'y a pas d'économie à adopter de petits éléments, car avec eux les acides ne peuvent guère servir plus d'une fois, tandis qu'avec de grands vases de 1^lit ils peuvent être employés quatre ou cinq fois.

LVIe MANIPULATION.

GALVANOPLASTIE.

Théorie.

La galvanoplastie a pour but de déposer sur des corps servant d'électrode négative les métaux contenus dans une dissolution saline traversée par un courant.

Elle comprend deux opérations : la fabrication des moules et leur métallisation.

Le dépôt doit être continu, à grain très fin, suffisamment épais et cohérent pour pouvoir se détacher facilement.

Nous indiquerons très brièvement dans cette manipulation les divers procédés employés dans la galvanoplastie au cuivre, en insistant spécialement sur les tours de main desquels dépend le succès ([1]).

Fabrication des moules. — On emploie de préférence pour les moules le métal fusible, la stéarine, le plâtre et la gutta-percha.

Le métal fusible est formé de huit parties de bismuth, trois d'étain et cinq de plomb; on fait fondre cet alliage dans une cuiller de fer bien propre, en ayant soin de ne le laisser sur le feu que le temps nécessaire pour déterminer une fusion complète, et on le répand goutte à goutte sur un marbre; puis on le soumet à une seconde fusion et on le verse dans la cavité que présente la face inférieure d'une soucoupe. Le métal s'étant étalé sous forme de goutte arrondie, on y laisse tomber à plat de $0^{m},08$ à $0^{m},10$ de hauteur la médaille que l'on veut reproduire : elle doit être très froide. En moins d'une minute le métal est solidifié ; il suffit de quelques légers chocs pour détacher l'empreinte.

Ces moules sont d'une extrême finesse : on en vernit le revers et les bords avec une dissolution de cire à cacheter fine dans l'alcool et on l'entoure d'un fil de cuivre en veillant à ce que son extrémité décapée touche le métal.

La stéarine qu'on emploie doit être additionnée de $\frac{2}{10}$ ou $\frac{3}{10}$ de cire et d'un peu de plombagine : ce mélange est fondu dans un petit vase de terre qu'on maintient près du feu après fusion complète. La médaille à reproduire étant fortement chauffée, on l'entoure d'un rebord de carton assujetti par un fil, et l'on enduit la surface d'une légère couche d'huile d'olives qu'on étend au pinceau : puis on verse la stéarine très chaude. Il faut attendre une heure ou deux avant de détacher

([1]) Charles WALKER, *Traité de Galvanoplastie*, traduit par le Dr Péan, e dans les *Manuels Roret* les volumes consacrés à la galvanoplastie, à la dorux et à l'argenture.

la médaille : enfin on recouvre le moule de plombagine bien sèche et on le frotte vivement avec un pinceau de poils de chameau. Aussi longtemps qu'il reste des points blanchâtres, lorsqu'on expose le moule à la vapeur de l'haleine, les frictions sont à continuer sur tout le champ de l'objet : on finit en l'entourant d'un fil de métal, en contact avec la surface plombaginée.

Le plâtre se coule de même que la stéarine : on emploie du plâtre de mouleur très fin, récemment préparé et on en forme une bouillie claire. Pour chasser les bulles d'air, on peut étendre d'abord une petite quantité de liquide sur la médaille au moyen d'un pinceau. Le moule étant sec, on le plonge cinq minutes dans un bain de stéarine très chaude, et on le laisse refroidir en plaçant le dessin à la partie supérieure. Comme ci-dessus, la surface est enduite de plombagine.

Quand on veut faire un moule de goutta-percha, on recouvre la médaille de plombagine et on y applique avec les doigts la substance rendue molle et plastique dans l'eau chaude : il est bon de finir l'opération à la presse.

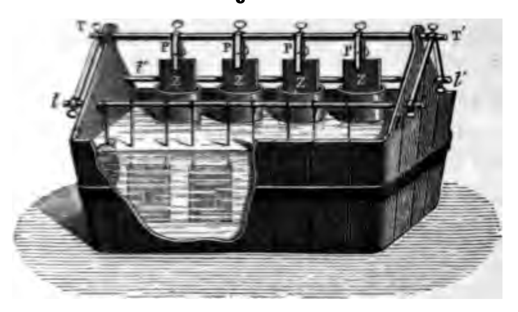
On peut avoir à cuivrer des objets délicats, tels que des fleurs, des insectes, etc. : dans ce cas, on prépare une dissolution de phosphore dans le sulfure de carbone et on y plonge le modèle quelques instants seulement, puis on l'immerge dans une solution faible de nitrate d'argent et on l'expose enfin au soleil : l'argent est réduit par la lumière et la surface de l'objet devient conductrice. Un courant d'acide sulfurique réduit aussi le nitrate d'argent et produit une couche de sulfure qui conduit le courant très également.

Métallisation galvanique. — L'appareil simple que l'on emploie dans les ateliers d'électrotypie est une modification de l'élément Daniell; il se compose (*fig.* 83) d'une cuve de bois contenant la dissolution de sulfate de cuivre, maintenue saturée par des cristaux renfermés dans des sachets de toile; au centre, sont disposés des vases poreux, pleins d'eau salée, dans laquelle les lames de zinc Z sont immergées. La traverse T soutient les zincs; les moules sont suspendus aux traverses t et t' qui sont reliées à la première par une tringle extérieure à la cuve; c'est par elle que se ferme le circuit.

Ce dispositif peut être considérablement simplifié : il suffit

de souder une galerie de cuivre à la partie supérieure du cylindre *c* (*fig.* 84) et de monter cette pile à l'eau salée et au sulfate de cuivre pour avoir un appareil fort économique

Fig. 83.

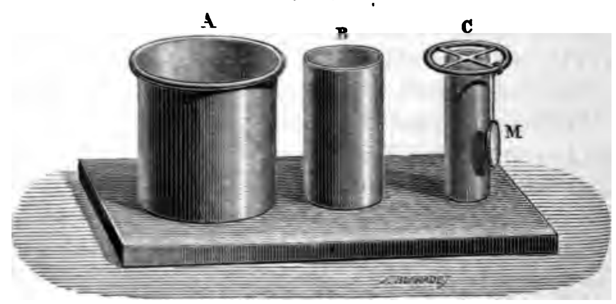


dans lequel on peut suspendre quatre ou cinq moules de médailles.

Quelquefois encore la pile est extérieure à la solution de cuivre : un élément de Daniell ou de Bunsen suffit le plus souvent pour une cuve.

L'opération doit être lente si l'on veut qu'elle soit régulière;

Fig. 84.



voici de plus les précautions qu'il faut prendre pour obtenir un dépôt fin et cohérent :

1° La solution cuivreuse doit être maintenue saturée dans toute la hauteur du vase; il importe donc que les sachets soient suspendus à la partie supérieure et qu'on agite de temps en temps le bain.

Le dépôt devient granuleux et cassant dès que la teneur normale en cuivre est abaissée, parce que le dépôt du métal n'est plus que le résultat d'une action secondaire; c'est pour éviter cet inconvénient qu'on suspend quelquefois au pôle positif en face des moules une lame de cuivre, qui, transformée progressivement en sulfate, maintient la richesse de la solution : il est bon que cette lame ait exactement l'étendue du moule.

2° La surface des moules doit aussi être égale à celle du zinc.

3° Il ne faut immerger les moules qu'après avoir monté l'appareil : si l'empreinte est métallique, la surface est instantanément recouverte de cuivre et elle n'est même pas mouillée par le liquide. Quand on emploie les moules plombaginés, l'opération n'est plus aussi rapide, car le dépôt, commencé près du conducteur, ne s'étend que graduellement aux autres parties. Le premier dépôt est souvent cassant et de mauvaise nature, parce que toute la puissance de l'appareil est concentrée sur un point; je corrige cet inconvénient en laisant le circuit fermé quelque temps sur une lame quelconque attachée au pôle négatif et en introduisant tous les moules à la fois dans le liquide au bout de cinq ou dix minutes. La marche de l'opération étant devenue régulière, je retire la lame conductrice et le dépôt s'achève fort bien.

Si quelque partie ne paraît pas suffisamment revêtue de plombagine, il faut retirer le moule du liquide, le laver dans l'eau, et le frotter de nouveau avec la mine de plomb, après l'avoir séché dans un pli de papier buvard; quelquefois on sauve le moule en procédant ainsi, mais en général un pareil accident présage un insuccès.

4° Le sulfate de cuivre doit être pur : le sulfate de zinc qui s'y mélange par osmose a pour effet de rendre le dépôt pulvérulent; la durée des bains est donc limitée alors même qu'ils seraient restés saturés.

Cet inconvénient n'existe pas évidemment quand on emploie l'appareil composé, dans lequel la source électrique est séparée du bain de cuivre.

Quarante-huit heures sont nécessaires pour obtenir un dépôt bien compact. On sépare les épreuves des moules de

métal fusible en soulevant peu à peu les bords avec un outil pointu, dont on se sert en guise de levier : les moules de plâtre ou de cire s'isolent sans difficulté, après qu'on a refoulé le cuivre qui embrasse leur circonférence ; enfin la gutta-percha ramollie à l'eau chaude se sépare facilement aussi du métal, lorsque le dépôt est fin et brillant.

LVII[e] MANIPULATION.

DORURE ET ARGENTURE.

Théorie.

Cette manipulation a pour objet de déposer sur certains métaux une couche adhérente d'or ou d'argent.

Le principe de cette opération est le même que pour la galvanoplastie : mais les tours de main sont bien plus nombreux et le succès moins assuré.

Description.

On opère le plus souvent avec des appareils composés : le courant de quelques éléments Daniell traverse le bain contenu dans une capsule de porcelaine qu'on peut chauffer à volonté.

L'électrode positive est constituée par une lame d'or ou d'argent ; l'objet à dorer ou à argenter est attaché à l'électrode négative en face de la lame de métal précieux.

Composition des bains.

LIQUIDES A DÉCAPER.

Pour mat......	AzO^5,HO	1^{lit}
	$NaCl$	30^{gr}

Pour brillant...	AzO^5, HO	$\frac{1}{2}$lit
	SO^3, HO	$\frac{1}{2}$lit
	$NaCl$	30gr
	Suie grasse	10gr

LIQUIDE A AMALGAMER.

lution faible d'azotate de mercure, qu'on obtient en dissol-de l'oxyde de mercure dans l'acide azotique : il suffit d'en ›r quelques gouttes dans l'eau et d'y ajouter un peu de pour faire disparaître le précipité qui a pu se former.

BAIN D'ARGENT.

Cyanure d'argent..........................	8gr
» de potassium	40gr
HO	1lit

AUTRE BAIN.

Chlorure d'argent..........................	20gr
Prussiate jaune de potasse..................	10gr
Cyanure de potassium......................	50gr
HO..	1lit

BAIN D'OR.

Chlorure d'or..............................	5gr
Cyanure de potassium......................	50gr
HO..	1lit

AUTRE BAIN.

Chlorure d'or..............................	1gr
Bisulfite de soude cristallisé................	20gr
Phosphate de soude........................	80gr
Cyanure de potassium......................	2gr
HO..	1lit

AUTRE BAIN (A FROID).

Chlorure d'or..............................	1gr,5
Bisulfite de soude cristallisé................	15gr
Phosphate de soude........................	45gr
Cyanure de potassium......................	3gr
HO..	1lit

Manuel opératoire.

1° L'argent et le cuivre peuvent être dorés directement, mais le fer, l'acier, le plomb, l'étain et leurs alliages doivent être préalablement recouverts d'une couche de cuivre.

La pièce cuivrée ou argentée est chauffée sur une lampe à alcool, afin de brûler les matières grasses qu'elle peut retenir à sa surface; puis elle est portée encore chaude dans un bain d'acide sulfurique au dixième, dans lequel elle séjournera vingt minutes au moins : c'est l'opération du *dérochage*.

Au sortir de ce bain, la pièce est lavée à grande eau et séchée à la sciure de bois dans une étuve.

2° L'objet est attaché ensuite à un fil métallique : à partir de ce moment il faut éviter soigneusement de le toucher avec les doigts.

On le plonge dans le liquide à décaper, pour mat ou pour brillant, suivant ce qu'on veut obtenir : il faut se rappeler que les surfaces seraient promptement et profondément attaquées si le contact du liquide acide était prolongé, surtout pour le cuivre.

Aussitôt que la pièce est retirée du bain, elle doit être lavée à grande eau, à plusieurs reprises; puis elle est passée au mercure par simple immersion et lavée aussitôt à l'eau.

Pour obtenir un beau brillant, on en frotte vivement la surface avec un morceau de peau.

Les diverses opérations du *décapage* doivent se suivre sans interruption et avec une grande célérité.

3° La pièce est aussitôt portée dans le bain d'or ou d'argent: on emploie deux éléments pour l'argenture, quatre pour la dorure. La température ne dépassera pas 50°.

L'action électrochimique commence immédiatement : on la prolonge plus ou moins suivant l'épaisseur de la couche qu'on veut déposer à la surface de l'objet.

4° La pièce est retirée du bain et soumise au gratte-boëssage à l'aide d'une brosse composée de fils de laiton rudes et droits, trempée dans l'eau de savon.

La plus grande difficulté de l'opération consiste dans le dé-

capage ; mais il importe aussi de surveiller attentivement le dépôt du métal précieux. Dans un bain d'argent trop pauvre en cyanure, l'électrode négative noircit ; elle reste blanche lorsque l'argent fait défaut, et le dépôt manque alors d'adhérence ; l'opération marche bien si le dépôt, gris au début, blanchit rapidement.

Dans le bain d'or l'électrode négative peut rougir fortement ; il est bon d'y ajouter dans ce cas 2gr de cyanure de potassium par gramme d'or.

L'or vert s'obtient par un bain mixte d'or et d'argent.

Sous l'influence d'un courant trop intense, les métaux se précipitent à l'état de poudre noire ; si le courant est trop faible, le dépôt est cristallin. On ne doit jamais voir l'hydrogène se dégager sur l'objet.

Une température trop élevée entraîne un défaut d'adhérence.

L'argenture prend facilement un aspect jaunâtre après avoir été exposée à la lumière, par suite de la décomposition du cyanure qui reste à la surface de l'argent et pour ainsi dire entre ses pores. On blanchit ces objets en les recouvrant d'une couche épaisse de borax en solution et en les portant à une température voisine du rouge cerise ; puis on les décape à l'acide sulfurique étendu, on les lave et on les sèche à la sciure de bois.

La mise en couleur de l'or s'obtient par le mélange suivant.

Azotate de potasse	25gr
Alun	25
Sulfate de zinc	12
» de fer	12

qu'on fait fondre dans son eau [illegible] tallisation et dont on recouvre la pièce ; on traite ensuite par la chaleur comme ci-dessus.

Terminons en indiquant le moyen de retirer l'or des vieux bains : en les attaquant par l'acide chlorhydrique et en laissant séjourner dans le liquide une lame de fer bien décapée, on précipite l'or et l'argent, qu'il est facile d'agglomérer en fondant avec de la potasse et du borax le dépôt qui se forme au fond du

vase. Cette opération doit se faire dans une pièce bien ventilée, car il se dégage une quantité notable d'acide cyanhydrique dont il faut débarrasser l'atmosphère à tout prix.

Nous recommanderons aussi de verser les liqueurs dans des vases spacieux, attendu que par l'addition de l'acide il se produit beaucoup d'écume.

LVIIIe MANIPULATION.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES COURANTS PAR LE VOLTAMÈTRE DE M. BERTIN.

Théorie.

Un même courant traversant un voltamètre décompose toujours la même quantité d'électrolyte : les mesures de quantité et d'intensité fondées sur l'emploi du voltamètre sont donc absolues.

Un courant dégageant p^{mgr} d'hydrogène par seconde est par suite entièrement défini, et, pour déterminer son intensité, il suffit de savoir qu'un courant d'un ampère décompose par seconde

$$0^{mgr},09373 \text{ d'eau } (^1);$$

on a donc

$$I = \frac{9p}{0,09373} = \frac{p}{0,01041}.$$

Mais il faut que le courant soit constant et qu'il puisse décomposer l'eau; ces conditions restreignent l'emploi du voltamètre, dont on ne se sert guère que pour calibrer les galvanomètres et les boussoles.

Les voltamètres sont à volumes ou à poids : l'instrument ordinaire dans lequel on jauge l'hydrogène est de la première

(1) J'adopte le chiffre de M. Mascart, communiqué à la Société de Physique le 17 février 1882; d'après M. Kohlrausch, il faudrait prendre 0,09470.

pèce; les seconds sont employés pour l'électrolyse des sels argent.

Dans ces derniers le courant est fermé par deux électrodes e ce métal, de poids connu, et il traverse une solution d'azotate; au bout d'un certain temps on ouvre le circuit, on lave es lames à l'eau distillée, on les sèche et on détermine l'accroissement de poids de l'une et la diminution de l'autre : les deux nombres doivent être identiques à $\frac{1}{1000}$ près, d'après M. Mascart. On trouve $1^{mgr},1248$ d'argent par ampère.

Cette méthode est assurément la meilleure (¹), cependant M. Bertin a transformé avec tant de bonheur le voltamètre à volumes que nous ne pouvons nous dispenser d'en faire l'objet d'une manipulation spéciale.

Description.

La partie caractéristique du nouvel instrument de M. Bertin (²) est une éprouvette ou cloche graduée terminée par un étranglement capillaire auquel succède une ampoule E et un tube de verre recourbé (*fig.* 82).

Un tuyau de caoutchouc T sert à aspirer le liquide du vase G dans l'éprouvette.

L'électrode négative sur laquelle se dégage l'hydrogène pénètre à la partie inférieure de la cloche en P' et le gaz remplit directement l'éprouvette, mais sans qu'aucune bulle puisse monter dans l'ampoule. Le tube capillaire jouit, en effet, de la double propriété de permettre le remplissage de l'éprouvette par aspiration et de barrer le chemin au gaz, pourvu qu'il y ait un léger excès de liquide dans l'ampoule.

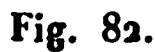
L'éprouvette étant remplie d'hydrogène jusqu'au niveau de l'eau dans le vase G, on prépare une nouvelle expérience en faisant remonter le liquide en E par aspiration : quelques cen-

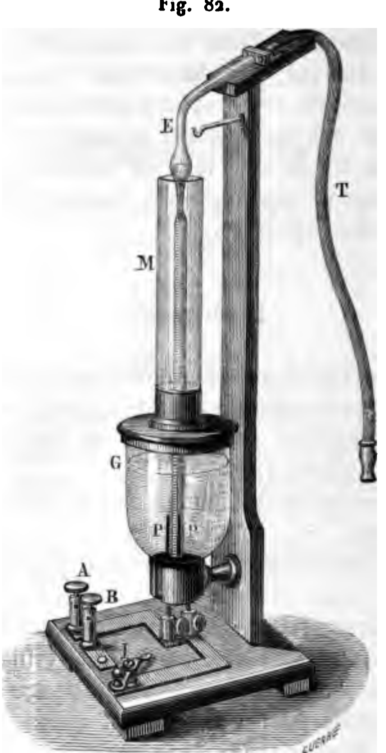
(¹) L'azotate d'argent est d'un usage moins commode que le sulfate de cuivre, à cause du peu d'adhérence des cristaux d'argent; mais le poids considérable de l'équivalent rachète cet inconvénient.

(²) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, t. XVI, p. 59; ce voltamètre est construit par MM. Ducretet et Cie, qui nous ont prêté le bois de la figure ci-dessous.

timètres cubes d'hydrogène dans les poumons ne pourraient y exercer d'action nuisible.

Un manchon M entoure la cloche : on le remplit d'eau pour refroidir le gaz et déterminer exactement sa température.


Fig. 82.



Le courant entre et sort par les deux bornes A et B ; un interrupteur à manette I permet d'ouvrir le circuit à volonté.

On lit sur l'éprouvette le volume V de l'hydrogène, mais il faut faire les calculs et les corrections d'usage pour en déduire son poids : appelant θ sa température, H sa pression et f la tension de la vapeur d'eau saturée, on a

$$P = V\, 1{,}293 . 0{,}069 \frac{H - f}{760} \frac{1}{1 + \alpha\theta}.$$

.a plus grande incertitude règne sur f, car c'est la tension l'eau acidulée, et il est évident qu'elle est moindre que celle l'eau pure. M. Bertin s'est assuré que, entre l'eau distillée l'eau acidulée au $\frac{1}{10}$, la différence de tension était d'environ ,002 vers 20 degrés. On peut aussi prendre pour f la ten- n de l'eau pure à (θ — 1°,5).

On sait que l'eau n'est pas un électrolyte : les acides pa- ssent jouer dans le phénomène un rôle plus considérable 'on ne le pensait autrefois. M. Berthelot a démontré que s résultats de l'électrolyse sont beaucoup plus réguliers iand on ajoute à l'eau de l'acide phosphorique au lieu d'a- le sulfurique.

Il conviendrait, pour diminuer la résistance considérable des ltamètres, qu'on employât de l'eau fortement acidulée; la oportion qui assure à l'électrolyte le maximum de conducti- lité paraît être de 31,6 pour 100 d'acide sulfurique du com- erce, la dilution ayant une densité égale à 1,233; l'acide pur t six fois plus résistant. Ce liquide doit être fréquemment nouvelé, et il est bon que sa température ne soit pas infé- eure à 20°, car il se forme moins d'eau oxygénée dans ces nditions.

Pour éviter la polarisation des électrodes, qui introduit une ce électromotrice dans le circuit, nous recommandons de ınir un instant les deux fils de platine au commencement l'expérience : les gaz condensés par le métal se recom- ıent.

Manuel opératoire.

:° Tenant de la main gauche un compteur à secondes et de la ıin droite la manette de l'interrupteur, on pousse le ressort r le bouton en même temps qu'on met le compteur en marche. niveau de l'eau baisse graduellement dans l'éprouvette.

2° Au moment précis où le liquide est de niveau à l'inté- eur et à l'extérieur, on arrête le courant et le compteur : on ıte aussitôt le volume V en dixièmes de centimètre cube et temps au $\frac{1}{5}$ de seconde.

3° On relève H au baromètre et on lit θ sur le thermomètre ıgagé dans le manchon M.

4° La même opération est répétée cinq fois et l'on prend la moyenne des intensités ainsi déterminées.

LIXe MANIPULATION.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES COURANTS PAR LA BOUSSOLE DES SINUS.

Théorie.

Un rhéomètre étant disposé de telle sorte que l'aiguille aimantée conserve toujours la même position par rapport au plan du cadre multiplicateur, les intensités de deux courants successifs seront entre elles comme les composantes efficaces de la force magnétique terrestre, c'est-à-dire comme les sinus des déviations de l'aiguille.

Tel est le principe de la boussole dite *des sinus*, dont les indications, rigoureusement exactes, n'ont aucune correction à subir et sont indépendantes de l'état magnétique de l'aiguille.

Pour calibrer l'instrument, il suffit de déterminer par comparaison avec le voltamètre la valeur de K dans la formule

$$i = \mathrm{K}\sin\varphi.$$

Évaluant l'intensité i_1 d'un courant constant par la boussole, on aura en ampères

$$i_1 = \mathrm{K}\sin\varphi_1;$$

le voltamètre donnera, d'autre part,

$$i_1 = 96$$

en désignant par p_1 le poids d'hydrogène recueilli, exprimé en milligrammes. On déduira de ces deux opérations

$$\mathrm{K} = \frac{96 p_1}{\sin\varphi_1}.$$

Description.

e cadre, de forme circulaire ou aplatie, est mobile autour 1 axe vertical, au-dessus d'un cercle azimutal sur lequel on ses déplacements angulaires; l'aiguille en losange allongé montée sur une pointe placée au milieu du cadre. Une légère en bois, fixée perpendiculairement en son milieu, met d'en suivre facilement les mouvements sur un limbe dué. Quand le courant fait dévier l'aiguille, on tourne le re en la suivant jusqu'à ce qu'elle s'arrête dans son plan et lit l'angle dont le cercle a tourné.

'lus le cadre de la boussole des sinus est petit, plus elle a sensibilité : aussi les constructeurs donnent-ils souvent à instrument la forme ordinaire du galvanomètre, en musant sa base d'un cercle azimutal.

.a boussole des sinus ne peut mesurer tous les courants, la valeur de 90°, qui est la plus grande que puisse atteindre igle, correspond à une certaine intensité finie. Mais, au 1 de maintenir l'aiguille sur le zéro du limbe, on peut l'asindre à s'en écarter d'un angle constant, 10°, 20°, 30°, voire me 45°; les nouvelles indications de la boussole sont encore ictes, et elles peuvent être reliées aux précédentes par un efficient de multiplication qu'on détermine de la manière ivante :

Soit φ_0 l'angle dont le sinus mesure l'intensité d'un count alors que l'aiguille est au zéro; cherchons quel angle φ_{10} era l'aiguille à 10° du plan du cercle; le coefficient de mulplication n est évidemment égal à $\frac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi_{10}}$: c'est donc par n i'il faudra multiplier les intensités mesurées dans ces nouelles conditions pour les comparer aux mesures normales.

Manuel opératoire.

1° La boussole mise de niveau, on dirige le cadre dans le méridien magnétique, de telle sorte que l'aiguille s'arrête au éro du limbe, et l'on note sa position sur le cercle azimutal.

2° Le courant déplace l'aiguille : on la suit avec le multiplicateur de manière à la ramener au repère fixe; l'angle dont le cadre a tourné est l'angle φ.

LX[e] MANIPULATION.

MESURE DE L'INTENSITÉ ABSOLUE DES COURANTS PAR LA BOUSSOLE DES TANGENTES.

Théorie.

Il est indispensable d'introduire les unités absolues dans la détermination des intensités des courants : la boussole *des tangentes* permet d'atteindre directement ce but.

Appelant R le rayon moyen d'une circonvolution du fil, n le nombre de tours, T l'intensité horizontale du magnétisme terrestre, l la distance des pôles de l'aiguille et φ la déviation de l'aiguille de la boussole, on a

$$i = \frac{RT}{2n\pi} \operatorname{tang}\varphi \left(1 - \frac{3l^2}{16R^2} + \frac{15l^2}{16R^2}\sin^2\varphi\right).$$

La valeur de T à introduire dans cette formule, rapportée aux unités C.G.S., est dix fois moindre que celle que nous avons déterminée dans la LI[e] manipulation (1) en fonction des unités de Gauss.

On se contente souvent de réduire le terme de correction au facteur

$$\left(1 - \frac{3}{16}\frac{l^2}{R^2}\right).$$

φ variant de 0 à 90, tangφ varie de 0 à l'infini.

---

(1) Les dimensions de T sont, en effet, $\dfrac{M^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}T}$, M, L, et T représentant les unités de masse, de longueur et de temps, suivant la notation habituelle.

On peut donc mesurer toutes les intensités de courant, con-
airement à ce qu'il en est pour la boussole des sinus; mais,
n discutant la formule, on trouve que le maximum de sensi-
ilité correspond à $\varphi = 0$, et que cette sensibilité devient nulle
our $\varphi = 90^\circ$. Il faut donc mesurer de très petits angles et
ecourir à la méthode optique de Poggendorff, de manière à
ompenser la petitesse de la déviation par la précision de la
nesure.

Les modifications de l'intensité du champ magnétique par
es masses de fer du voisinage imposent une détermination
irecte de T dans les conditions mêmes de l'expérience; de
lus les variations diurnes de T tendent à introduire une er-
eur nouvelle dans la mesure des intensités absolues des cou-
ants.

Quand on emploie le multiplicateur conique de Gaugain,
ui se rapproche beaucoup plus que la boussole ordinaire des
onditions de la théorie, la formule devient

$$\iota = \frac{RT}{4,504} \tang \varphi.$$

Le centre de l'aiguille se trouve alors au sommet d'un cône
roit dont le cercle de base, parcouru par le courant, a un
ayon double de la hauteur du cône. L'action est doublée
uand on emploie deux cônes placés symétriquement de
haque côté de l'aiguille (¹).

Description.

Le modèle le plus simple de boussole des tangentes se com-
ose d'une lame de cuivre, enroulée en cercle, ayant ses deux
xtrémités plongées dans des godets contenant du mercure
uxquels aboutissent les rhéophores (*fig.* 86). Un petit barreau
imanté très court est suspendu par un fil de soie sans torsion
u centre de ce cercle; sa longueur ne doit point dépasser le
ouzième du diamètre du conducteur circulaire; dès lors l'er-
eur de l'observation n'atteint pas $\frac{1}{100}$.

(¹) GORDON, *Traité expérimental d'Électricité et de Magnétisme*, traduit par Raynaud, I, p. 504.

On trouve souvent dans les laboratoires des boussoles qui

Fig. 86.

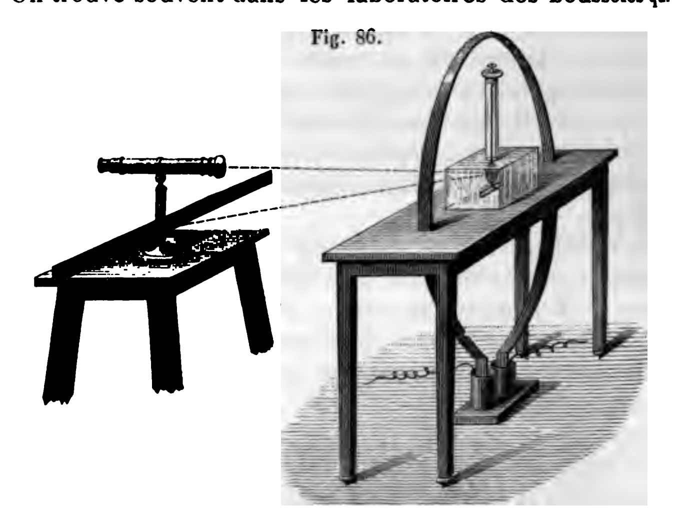
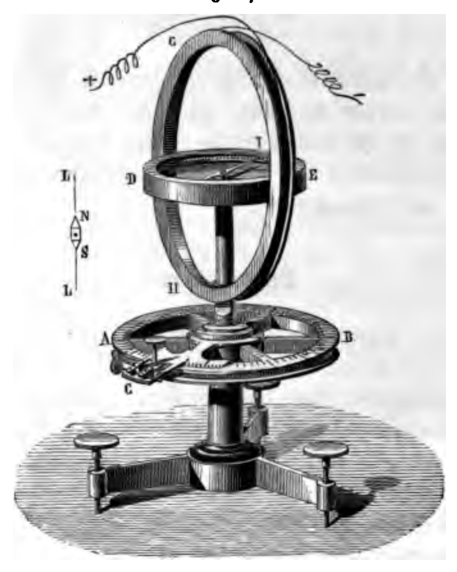


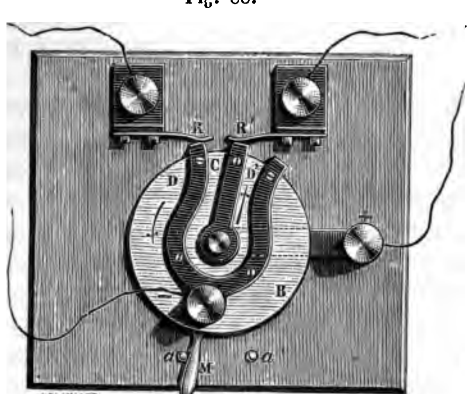
Fig. 87.



servent à deux fins pour la mesure des intensités par les sinus et les tangentes : ce type est représenté (*fig.* 87).

ros fil de cuivre recouvert de soie est enroulé plusieurs
our d'un cercle vertical de $0^m,400$ de diamètre. La me-
s petites déviations se fait encore, contrairement à ce
que la figure, à l'aide d'un miroir et d'une lunette,
pour l'appareil précédent.
uille se compose d'un barreau de $0^m,025$ de longueur;
de la boîte DE est en cuivre rouge pour amortir les os-
ns de l'aimant.
; nécessaire d'adjoindre à la boussole un commutateur,
ıière qu'on puisse à volonté interrompre ou renverser

Fig. 88.



ant : on emploie beaucoup aujourd'hui le commutateur
Bertin (*fig.* 88), qui présente l'avantage d'indiquer
que tous les autres la marche du courant.
ı'observe jamais de déviation stationnaire de l'aiguille,
rois oscillations consécutives φ_1, φ_2, φ_3, et l'on prend
la quantité moyenne

$$\frac{\varphi_1 + 2\varphi_2 + \varphi_3}{4}.$$

Manuel opératoire.

ıprès avoir mis la boussole de niveau, l'opérateur dirige
n du multiplicateur dans le méridien magnétique : l'ai-

guille s'arrête au zéro du limbe gradué, sur un repère quelconque, qui témoigne que cette première condition est remplie.

2° Le cercle est introduit dans le circuit du courant voltaïque dont on cherche l'intensité et l'on observe trois positions successives de l'aiguille sur la mire, ainsi qu'il a été dit ci-dessus; on en déduit sa position moyenne, à gauche du zéro par exemple.

3° Pour éliminer l'erreur qui résulterait de ce que le multiplicateur serait en dehors du méridien, on renverse le courant et l'on procède à une nouvelle observation; l'aiguille prend une position symétrique de la première à une distance angulaire 2φ, qu'il suffit de diviser par deux pour appliquer la formule.

Quand les écarts sont trop considérables, il faut réduire l'intensité du courant par un shunt ou bien se résoudre à lire les angles sur le limbe gradué : dans ce dernier cas, il convient de vérifier d'abord que le centre de l'aiguille coïncide avec le centre du cadran. On manœuvrera donc les vis calantes du pied de l'instrument, de façon que les extrémités de l'aiguille soient respectivement sur la ligne 0–180 de la graduation.

De plus, on lira les angles par les deux pointes de l'aiguille, et l'on fera la moyenne des valeurs relevées. Pour éviter les erreurs de parallaxe, l'observateur doit placer son œil le plus près possible de la glace qui recouvre le limbe et verticalement au-dessus de la pointe de l'aiguille, de telle sorte que l'image réfléchie de l'œil se superpose au degré qu'il faut noter.

Pour amortir les oscillations de l'aiguille, on se sert d'un petit aimant qu'on approche plus ou moins de la boussole, sauf à l'en éloigner le plus possible au moment de la lecture des angles. Le commutateur peut lui-même être employé à cette fin; le courant convenablement interrompu est alors utilisé pour éteindre le mouvement de l'aiguille et, avec un peu d'habileté et d'habitude, on parvient très rapidement à réduire considérablement l'amplitude des oscillations.

Résultats.

Une boussole des tangentes portant quinze tours de fil, dont la longueur développée est de $18^{m},99$, donne lieu aux calculs suivants :

$$\text{Rayon moyen } R = \frac{1899}{15.2.3,1416} = 20^{cm},15.$$

Prenons T égal à 0,188, en unités C.G.S :

$$\frac{RT}{2n\pi} = \frac{20,15.0,188}{2.15.3,1416} = 0,0419.$$

$$i = 0,0419 \tang\varphi.$$

Le terme de correction se calcule à part pour les déterminations précises.

M. Kohlrausch a comparé, à l'aide de la boussole des tangentes, les courants fournis par une pile de Grove et une machine de Holtz, et il a trouvé que le courant maximum de cette machine ne pouvait décomposer par seconde que $0^{mgr},0000035$ d'eau; un élément de Grove produirait le même effet dans un circuit dont la résistance serait de 4500 ohms environ (1).

LXIe MANIPULATION.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES COURANTS FAIBLES PAR LES GALVANOMÈTRES A RÉFLEXION.

Théorie.

Les galvanomètres sont employés généralement à l'observation des courants faibles.

On peut du reste toujours ramener une intensité dans des

(1) *Annales de Poggendorff*, CXXXV, p. 194.

limites données à l'aide de résistances et de bobinés de dérivation; en effet, si ρ est la résistance du galvanomètre et r celle de la dérivation, le courant qui traverse l'instrument est égal au courant principal multiplié par $\frac{r}{r+\rho}$. Cette fraction peut descendre jusqu'à $\frac{1}{999}$.

Les galvanomètres sont appelés soit à déceler l'existence des plus faibles courants, soit à mesurer leur intensité : dans le premier cas, l'aiguille est astatique et la bobine est disposée de telle sorte que le champ de force électromagnétique soit maximum; dans le second cas, le champ de force est au contraire rendu aussi uniforme que possible, comme dans la boussole des tangentes. On applique correctement à ces derniers instruments la méthode des tangentes, sans recourir aux tables ordinaires de graduation qui sont inutiles, vu la petitesse des angles observables par réflexion. Cependant, en certains cas, une graduation peut devenir nécessaire : on l'établit alors par comparaison avec le voltamètre ou avec la boussole des tangentes, ou encore en introduisant des résistances connues dans le circuit d'un courant constant et en calculant les intensités par la loi de Ohm [1].

Mais un galvanomètre n'est pas seulement destiné à faire connaître la valeur relative des intensités produisant deux déviations données, mais encore la valeur absolue en ampères de chacune d'elles. Le calibrage doit donc aussi être absolu : on le fait en observant la déviation produite par une force électromotrice connue, envoyant son courant à travers une résistance du fil et du galvanomètre connue.

Il n'est pas inutile de faire observer ici que dans un galvanomètre vertical la grandeur de la déviation est fonction du degré d'aimantation de l'aiguille et que, par suite, les indications de ces instruments ne sont pas comparables, tandis que, dans les galvanomètres horizontaux, à une même intensité correspond une même déviation.

---

(1) M. Marcel Deprez a très heureusement appliqué à la graduation des galvanomètres la méthode générale adoptée par Poggendorff pour mesurer la force électromotrice des piles. *Voir* aux *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, XCIV, p. 1347; 15 mai 1882.

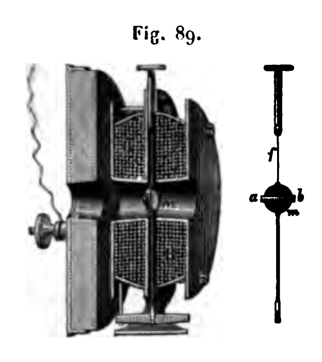
Le principe des instruments à réflexion est suffisamment connu par ce qui en a été dit dans la LIe manipulation : nous n'insisterons pas davantage.

Description.

Le type des galvanomètres sensibles est celui de sir W. Thomson : il est astatique ou non, à fil court et gros ou long et fin.

Les aimants n'ont guère plus de $0^m,003$ de longueur : ils sont collés au dos du miroir concave *m* (*fig.* 89), et ne pèsent en tout que $0^{gr},012$.

Fig. 89.



Pour éviter d'avoir toujours à placer l'appareil dans le méridien, un grand aimant courbe, faiblement magnétique, est disposé au-dessus de l'instrument. On peut le faire glisser avec la main le long d'une colonne verticale sur laquelle il est engagé à frottement dur : par sa force directrice, il constitue un méridien magnétique artificiel, qu'on peut diriger dans tous les azimuts, en faisant tourner l'aimant ou la colonne au moyen d'une vis tangentielle.

Quand l'aimant est orienté comme l'aimant terrestre, son pôle boréal au nord, sa force directrice s'ajoute à celle de la terre, et la sensibilité de l'instrument est minimum ; elle est maximum quand la force directrice de l'aimant est opposée et à peu près égale à la force terrestre.

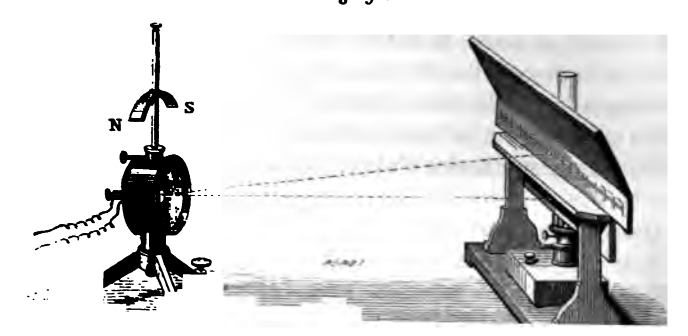
Il y a deux méthodes d'observation : par une lunette ou par une mire.

Quand on se sert d'une lunette L (*fig.* 90) on la dispose en face de l'instrument et l'on vise la règle divisée circulaire RR' dont le centre coïncide avec l'axe de l'aiguille. Mais on emploie plus généralement la disposition de la *fig.* 91, dans laquelle la lumière d'une lampe est réfléchie sur une mire. Il faut alors une source de lumière très intense telle qu'une

Fig. 90.



Fig. 91.



ıpe à huile de pétrole ou de paraffine ; un bec de gaz pour-
t être insuffisant.

Le faisceau lumineux traverse une fente étroite ménagée

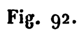
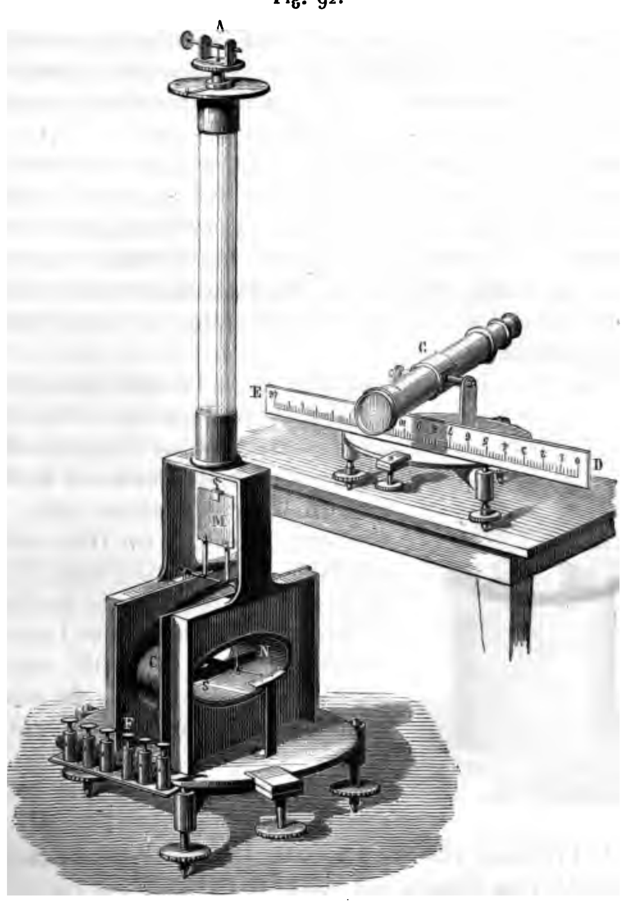


Fig. 92.



-dessous de l'échelle : pour augmenter la netteté de l'i-
age réfléchie sur la division, on place quelquefois une len-
lle convergente en avant du galvanomètre, de manière à
rmer un foyer sur la mire ; on peut encore disposer cette
ntille dans un tube en avant de la fente. On augmente la

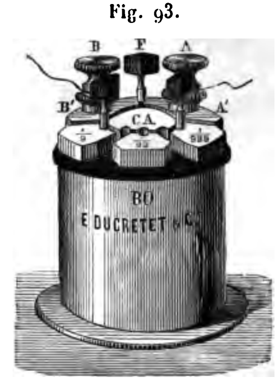
précision de la lecture en recevant le rayon à travers une ouverture rectangulaire traversée par un fil fin vertical qui produit une ligne sombre au milieu de l'image lumineuse de la fente.

L'échelle est mobile sur son support : on peut donc faire coïncider le zéro de la graduation qui est au milieu de la règle avec la position d'équilibre stable de l'aiguille : quand on a besoin d'une portée plus considérable, on amène le rayon au repos sur une extrémité de l'échelle.

La boussole de Weber convient mieux pour mesurer exactement les intensités : le barreau NS (*fig.* 92), solidaire avec le miroir M, est soutenu par un écheveau de soie écrue au centre d'un cadre; on en mesure les déviations par la lunette G sur la règle DE. Les fils, fractionnés en trois longueurs, aboutissent aux six bornes F et permettent d'opérer avec des sensibilités diverses.

On ne tient pas assez compte, dans l'emploi des galvanomètres, de l'action que peut exercer un fil conducteur sur l'aiguille magnétique, et je crois nécessaire de signaler aux expérimentateurs cette cause d'erreur, légère, il est vrai, mais appréciable sur un instrument délicat; ils prendront toujours la précaution de faire courir l'un contre l'autre les fils d'entrée et de sortie sur une assez grande longueur, de manière qu'ils annulent réciproquement leur action.

Fig. 93.



La *fig.* 93 représente une boîte de résistances construite par MM. Ducretet et Cie pour réduire à volonté les déviations au $\frac{1}{10}$, au $\frac{1}{100}$ ou au $\frac{1}{1000}$: on appelle ces boîtes des *shunts*.

Inutile de faire observer qu'elles ne peuvent être employées qu'avec les galvanomètres pour lesquels elles ont été combinées (1).

(1) Le problème se pose ainsi qu'il suit : quelle doit être la résistance x d'

Manuel opératoire.

1° Le galvanomètre est mis de niveau à l'aide des vis cantes dont est muni le pied.

2° L'aiguille est soulevée au-dessus des appuis sur lesquels le repose quand on ne se sert pas de l'instrument; on voit lors le miroir prendre une mobilité extrême.

3° L'échelle est placée en face du galvanomètre, à une diance de $0^m,75$ à 1^m, suivant la puissance de l'appareil opque. La lumière est disposée de champ derrière la fente our obtenir l'effet maximum; l'image réfléchie doit être ette; si l'on observe par une lunette, il faut en régler le tirage t la position.

4° En faisant tourner légèrement le bouton auquel l'écheeau de soie est attaché, on amène l'image au zéro : si l'on emloie un galvanomètre Thomson, l'aimant directeur permet 'annuler complètement l'action de la terre et d'employer l'apareil dans une position quelconque.

---

aque bobine du shunt, afin que le $\frac{1}{10}$, le $\frac{1}{100}$ ou le $\frac{1}{1000}$ du courant total raverse le galvanomètre?

Soit R la résistance du galvanomètre; nous aurons

$$\frac{1}{10} = \frac{x}{R+x},$$

$$10 = 1 + \frac{R}{x},$$

$$x = \frac{R}{9}.$$

La résistance de la dérivation doit donc être égale à $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$ ou $\frac{1}{999}$ de la résistance du galvanomètre.

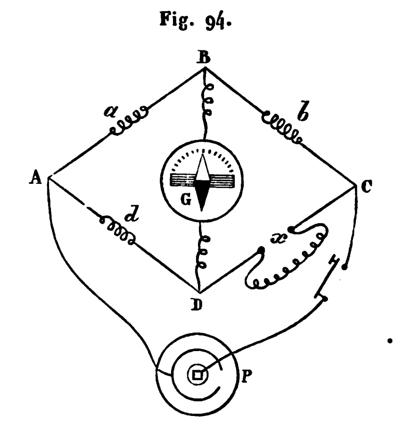
LXIIe MANIPULATION.

MESURE DES RÉSISTANCES ET DES CONDUCTIBILITÉS SPÉCIFIQUES PAR LE PONT DE WHEATSTONE.

Théorie.

Les diagonales du parallélogramme ABCD (*fig.* 94) occupées par une pile P et un galvanomètre G, ce der

Fig. 94.



marque zéro lorsque les résistances *a*, *b*, *c* et *x* répond l'égalité

$$ax = bd,$$

d'où

$$x = \frac{d}{a} b.$$

Pour déterminer *x*, on se donne *b* et l'on cherche valeur de $\frac{d}{a}$ amène le galvanomètre au zéro : cette mé suppose l'emploi d'un *pont à fil divisé* [1].

[1] *Journal de Physique*, II, p. 53 et 288 (1873); *Die Lehre vom Galv* von G. Wiedemann, I, p. 250.

Mais on peut encore prendre b pour variable, en établissant un rapport fixe entre d et a : pour appliquer cette méthode, il suffit de disposer d'une *boîte de résistances* montée en forme de pont.

Quand on connaît la résistance R d'un conducteur à une température t, il est facile d'en déduire sa conductibilité spécifique C_0 à zéro : on a, en effet, pour résistance R_0 à zéro,

$$R_0 = \frac{R}{1 + \alpha t},$$

α étant le coefficient moyen d'augmentation de résistance par degré, et

$$C_0 = \frac{L}{SR_0} = \frac{L(1 + \alpha t)}{SR},$$

L et S étant la longueur et la section du conducteur. On évite la mesure de la section en prenant le poids P de la longueur L d'un fil de densité D ; dans ce cas,

$$C_0 = \frac{L^2 D(1 + \alpha t)}{PR}.$$

L se mesure en centimètres et P en grammes; S est implicitement exprimé en centimètres carrés.

Description.

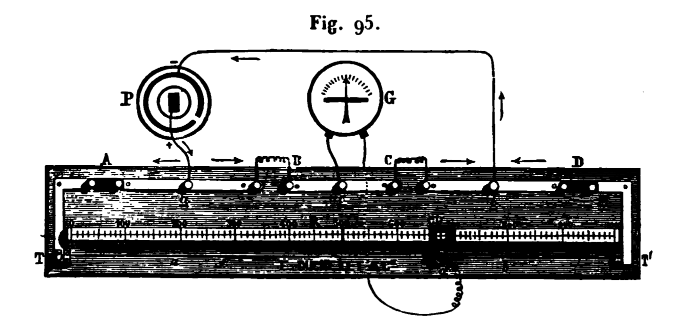
La *fig.* 95 représente le pont de Wheatstone, modifié par M. Forster, tel que le construisent MM. Elliott frères, à Londres, et Ducretet, à Paris : c'est le pont à fil divisé, appelé aussi *pont à curseur*.

Un fil de maillechort TT', de $1^{mm},5$ à 2^{mm} de diamètre et d'environ 1^m de long, est tendu parallèlement à une règle divisée. De larges bandes de cuivre rouge épais font le tour de la planchette de l'appareil et constituent le parallélogramme théorique décrit ci-dessus : les extrémités du fil y sont attachées par des tendeurs à vis butante. Un curseur mobile, à cheval sur la règle, muni d'un index, divise la longueur TT'

en deux parties T*d* et *d*T′ qui correspond aux résistances *d* et *a* de la *fig.* 89; le galvanomètre G est disposé sur une diagonale, la pile sur l'autre. En B on intercale entre les bandes la résistance type, en C le conducteur dont on cherche la résistance *x*.

Deux ouvertures extrêmes A et B, fermées en travail courant par des plaques de cuivre de résistance inappréciable, peuvent recevoir des conducteurs de résistance connue, de manière à

Fig. 95.



constituer un prolongement non gradué des deux sections du fil divisé : l'effet de ces conducteurs est d'augmenter la sensibilité de l'appareil pour la mesure des grandes résistances, avec une échelle de graduation limitée.

Il est à remarquer que le pont de Wheatstone n'exige pas une pile constante, parce que la mesure que l'on réalise est indépendante de l'intensité du courant dans les circuits dérivés. La polarisation de l'élément ne nuit donc pas à l'exactitude du procédé de comparaison. On emploie avantageusement un Daniell monté au sulfate de zinc et de cuivre, ou bien un élément Leclanché.

Le curseur porte habituellement une manette à ressort : le courant n'est fermé qu'au moment où l'on abaisse ce contact sur le fil.

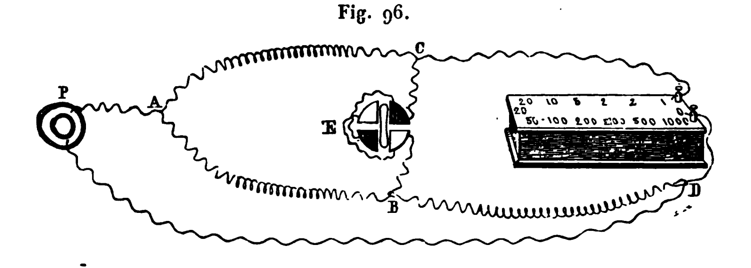
Le galvanomètre G doit être très sensible, mais il joue ici le rôle d'un galvanoscope auquel on demande seulement de déceler l'existence du courant : on emploie souvent le galvanomètre à réflexion de Thomson et quelquefois des électromètres dont les deux paires de quadrants sont reliées avec les

xtrémités du pont; quand ces deux points sont au même potentiel, l'intensité du courant est nulle dans le pont.

M. Wietlisbach a le premier ([1]) employé le téléphone pour constater l'absence de courant dans le pont; MM. Lorenz et Kohlrausch ont généralisé cette méthode et en ont obtenu les meilleurs résultats ([2]). Il convient de se servir d'un téléphone à fils gros et courts : au moment où le circuit est fermé, on entend un choc contre la membrane, et il suffit d'un peu d'exercice et d'une salle d'expériences bien silencieuse pour dépasser même la rigueur d'observation dont est susceptible le meilleur électromètre.

Les boîtes de résistances sont aussi d'un excellent usage : on les emploie quand on veut appliquer la seconde méthode. La pile P (*fig.* 96) et le galvanomètre ou l'électromètre E sont encore intercalés dans les diagonales du parallélogramme; en AC et AB sont les résistances dont le rapport est fixe; en BD se trouve la résistance à mesurer x; enfin la résistance type b est disposée entre les points C et D, sous forme d'une boîte graduée en ohms. La *fig.* 97 représente la même

Fig. 96.



disposition dans laquelle la boîte de résistance est elle-même montée en forme de pont : on trouve dans le commerce de semblables boîtes adaptées spécialement à cet usage.

Il est avantageux de placer un interrupteur dans le circuit de la pile pour fermer le courant à volonté.

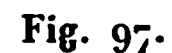
Le rapport des résistances AC et AB peut être pris égal à l'unité : dans ce cas, $x = b$. Il n'y a donc qu'à chercher par

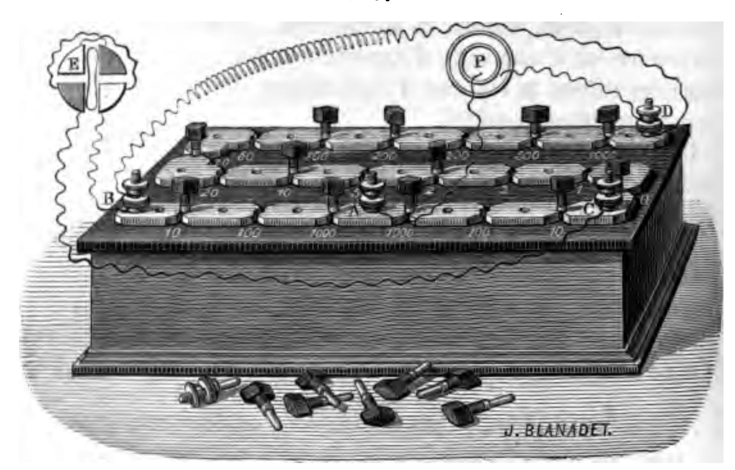
([1]) *Berliner Monatsbericht*, 1879, p. 280.

([2]) *Annales de Wiedemann*, VII, p. 168 (1879), et XI, p. 656 (1881).

tâtonnement le nombre et la position des chevilles qu'il faut enlever pour réduire à zéro la déviation de l'instrument galvanoscopique.

L'appareil de M. Forster est assurément plus commode que celui-ci, mais il n'est point susceptible d'une aussi grande ri-


Fig. 97.



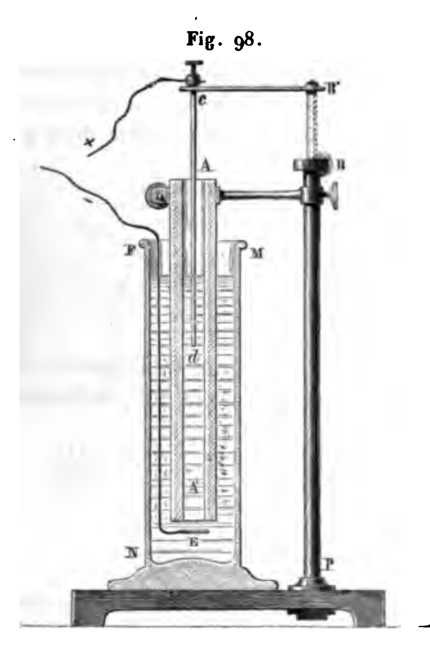
gueur, car son fonctionnement repose sur l'hypothèse que le fil divisé a une résistance uniforme : or cette hypothèse n'est presque jamais réalisée, car chaque éraillure faite par le curseur et la moindre altération de ce fil exposé à l'air affectent notablement sa conductibilité; les résistances des boîtes sont au contraire strictement égales aux valeurs inscrites.

Les méthodes de mesure appliquées dans cette manipulation conviennent aussi à la détermination des résistances liquides, notamment de certaines dissolutions salines : on les renferme dans le rhéostat à liquide (*fig.* 98) composé d'un tube de cristal AA′ parfaitement cylindrique, soutenu dans l'axe d'une éprouvette MN; le courant arrive par la tige *cd*, mobile par le jeu du pignon B et se ferme par la plaque E et le fil EF.

Un vernier permet de mesurer le chemin parcouru dans le liquide entre les points *d* et E; la longueur L et la section S

sont donc connues. Les électrodes doivent être du même métal que la base du sel, de manière que les forces électromotrices développées au contact du liquide soient égales et de signe contraire. Cette méthode ne fournit que des résultats approchés, mais on peut s'en contenter dans la plupart des cas. M. Kohlrausch a supprimé la principale cause d'erreur du procédé en recourant à des courants alternatifs au lieu de courants continus. Il y a avantage à employer toujours des courants faibles.

Fig. 98.



Manuel opératoire.

Première méthode.

1° La pile étant montée et le galvanomètre installé, on fait passer le courant dans le pont en pressant le bouton du curseur : après quelques tâtonnements, l'opérateur constate que

la réduction au zéro est effectuée pour une distance m du curseur à l'extrémité de la règle métrique; soit 1000^{mm} la longueur totale du fil :

$$x = b\frac{m}{1000 - m}.$$

2° Pour s'affranchir d'un défaut d'homogénéité du fil, on intervertit les résistances en leur faisant échanger leurs positions, et l'on effectue, à partir de la même origine, une nouvelle lecture m', généralement différente de la première :

$$x = b\frac{1000 - m'}{m'}.$$

On en déduit

$$x = b\frac{1000 + (m - m')}{1000 - (m - m')}.$$

En plaçant en A et en B deux résistances quelconques R égales, évaluées en longueur de fil TT', la formule devient

$$x = b\frac{1000 + (m - m') + 2R}{1000 - (m - m') + 2R}.$$

Deuxième méthode.

Le manuel opératoire de cette méthode ne diffère de la précédente qu'en ce que l'expérimentateur, au lieu de faire glisser un curseur le long d'une règle et de mesurer une longueur, a des fiches à déplacer et une somme à supputer.

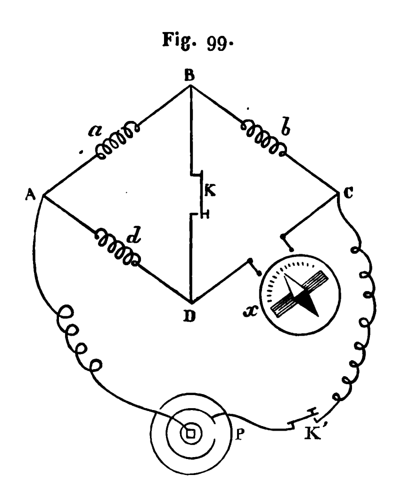
Sur la *fig.* 97, $x = 50 + 200 + 20 + 5 + 2 + 1 = 278$ ohms.

Résistance des galvanomètres. — Pour déterminer la résistance d'un galvanomètre, on opère comme ci-dessus, en enlevant ou fixant l'aiguille, et l'on traite le problème comme s'il s'agissait d'un fil ordinaire. Mais il peut arriver qu'on ne dispose dans son laboratoire d'aucun autre galvanomètre sensible que celui dont on veut mesurer la résistance : alors il faut évidemment modifier le procédé. Nous empruntons la solution suivante à l'excellent Traité de Gordon ([1]).

([1]) *Traité expérimental d'Électricité et de Magnétisme,* I, p. 556.

Le galvanomètre muni de son aiguille est disposé en x (*fig.* 99), dans la position occupée dans l'expérience précédente par le fil dont on voulait mesurer la résistance; mais, à la place qu'occupe d'habitude le galvanomètre, on met un simple fil dont la continuité est brisée par une clef de contact K. Le pont ayant été rompu, et le courant étant introduit

Fig. 99.



par l'interrupteur K' dans le circuit, l'aiguille du galvanomètre déviera évidemment; on note l'angle d'écart α, puis on ferme le pont par la clef K. Généralement la déviation du galvanomètre varie par le fait même : on dispose alors de $\frac{d}{a}$ ou de b, jusqu'à ce que le contact en K n'augmente ni ne diminue la déviation. Cette méthode très élégante est entièrement calquée sur celles qui ont été appliquées dans cette manipulation.

Résultats.

Quand on se propose de déterminer C_0, on doit chercher d'abord la valeur de α, coefficient d'augmentation de la résistance par degré : nous empruntons le Tableau suivant au Traité de Gordon, qui le cite d'après Maxwell. Il faut comprendre par

résistance spécifique celle d'un cylindre de $0^m,01$ de long et $0^{mq},0001$ de section. C'est l'inverse de la conductibilité.

	RÉSISTANCE spécifique en unités absolues.	VARIATION pour 100 de la résistance à 20°.	DENSITÉS.
Argent écroui	1609	0,377	10,50
Cuivre	1642	0,388	8,95
Or	2154	0,365	19,27
Plomb	19847	0,387	11,39
Mercure	96146	0,072	13,596
HO + 35 pour 100 SO^4H	1260000000	1,259	—

Pour évaluer ces résistances en ohms, il faut les diviser par 10^9.

Il se présente souvent en pratique qu'on ait à déterminer la conductibilité spécifique d'un conducteur de cuivre en fonction de celle du métal chimiquement pur; dans ce cas, il est utile de savoir que :

1° Un ohm équivaut à 48638^{mm} de fil de cuivre pur de 1^{mm} de diamètre à zéro;

2° Un fil de cuivre pur de 1^m de long et pesant 1^{gr} a une résistance à zéro de $0^{ohm},144$.

La résistance du cuivre du commerce est environ double de celle du cuivre pur.

Voici, d'après différents physiciens, les résistances des liquides de la pile :

LIQUIDES.	DENSITÉS.	TEMPÉRATURE.	RÉSISTANCE spécifique en unités absolues.
Eau	1,00	4°	9.10^{11}
Eau acidulée sulfurique	1,30	8	$0,94.10^9$
id.	1,70	8	$6,25.10^9$
Sulfate de cuivre saturé	1,2051	10	$29,\ 3.10^9$
Sulfate de zinc saturé	1,4220	10	$36,\ 7.10^9$

ne nous paraît pas hors de propos de donner ici la valeur tive des principales unités de résistance employées autre-

Unités de résistance.

NOMS DES UNITÉS.	OHM.	SIEMENS.	JACOBI.	FIL FRANÇAIS
Ohm	1,0000	1,0475	1,568	0,1078
Siemens	0,9546	1,0000	1,498	0,1030
Jacobi	0,6373	0,6675	1,000	0,0687
Fil français	9,2753	10,0970	14,560	1,0000

L'ohm représente dans ce Tableau, aussi exactement qu'il t possible de l'affirmer aujourd'hui, 10^9 unités absolues C.G.S.; l étalon provisoire de cette valeur est déposé au laboratoire avendish, à Cambridge.

L'unité de Siemens est un cylindre de mercure pur à zéro, ant 1^m de longueur et 1^{mmq} de section.

Jacobi avait adopté pour unité pratique celle de 25 pieds fil de cuivre pesant 345 grains.

Enfin l'unité télégraphique française correspond, suivant igney, à celle de 1^{km} de fil de fer de $0^m,004$ de diamètre.

NOTE.

La mesure de résistance des isolants ne peut guère s'effectuer par les océdés généraux qui font l'objet de cette manipulation. Cependant il t possible d'utiliser le dispositif de cette expérience pour s'assurer de solement d'un fil entouré de gutta-percha, en l'immergeant dans une rouvette contenant un liquide bon conducteur; un des pôles d'une pile ssédant une grande tension est mis en communication avec le fil mé-llique, tandis que l'autre se termine à une large électrode immergée ans le liquide; dans ces conditions, un fil convenablement isolé doit pré-enter une résistance énorme.

S'il était possible de déterminer exactement la résistance de ce circuit omplexe de métal et de liquide, on aurait

$$R = \frac{l}{2\pi C}(\log r' - \log r),$$

en appelant l la longueur, r' et r les rayons extérieur et intérieur et C la conductibilité spécifique de la gaine isolante (1).

D'après MM. Ayrton et Perry, la résistance spécifique de la gutta-percha serait égale à $4,5.10^{23}$.

LXIIIe MANIPULATION.

MESURE DE LA RÉSISTANCE INTÉRIEURE D'UNE PILE.

Théorie.

La méthode que nous emploierons a été inventée par sir W. Thomson; il m'a été donné de l'étudier et d'en apprécier les avantages dans le laboratoire de M. Desains, et je suis heureux d'en trouver dans le *Journal de Physique* un exposé complet, dû à la plume de M. Mouton, directeur-adjoint de ce laboratoire à l'École pratique des Hautes Études (2). Je le reproduis presque intégralement.

On introduit, dans le circuit de la pile P, dont on cherche la constante, un rhéocorde r (*fig.* 100) et un galvanomètre G; celui-ci marque une déviation δ. On jette alors un pont AB de résistance s, y compris celle du shunt intercalé S : la déviation du galvanomètre diminue; on la ramène à sa valeur primitive δ en diminuant le fil du rhéocorde r.

Soient G la résistance du galvanomètre, b celle du rhéocorde à la première expérience, E la force électromotrice de la pile, x sa résistance, et i l'intensité du courant correspondant à la déviation δ; on a

$$i = \frac{E}{x + G + b}.$$

---

(1) Jamin et Bouty, *Cours de Physique de l'École Polytechnique*, t. IV, 1er fasc., pages 58, 98 et 109.

(2) *Journal de Physique*, V, p. 146; 1876.

A la deuxième expérience, le rhéocorde a une résistance b', et l'on démontre sans peine que

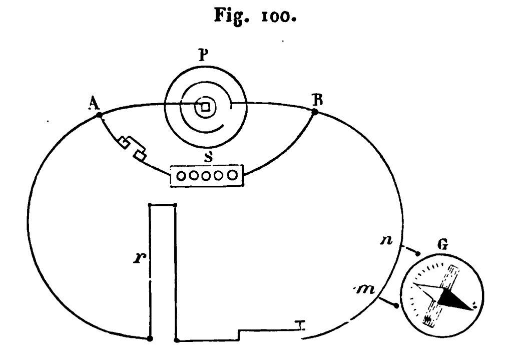
$$i = \frac{Es}{x(s + b' + G) + s(b' + G)},$$

d'où, en égalant et réduisant,

$$x = s\frac{b - b'}{b' + G}.$$

Généralement le galvanomètre est placé sur une dérivation mn de $0^m,030$ à $0^m,040$ de longueur pour un diamètre du

Fig. 100.



fil de cuivre de $0^m,001$ environ. On peut aussi employer le shunt spécial au galvanomètre que nous avons décrit dans la précédente manipulation.

Description.

Le rhéocorde de Pouillet se prête fort bien à cette expérience, à condition d'avoir 1^m de long et d'être formé de fils suffisamment résistants, tels que seraient des fils d'acier de $\frac{1}{3}$ de millimètre au plus de diamètre.

Une boîte de résistances peut servir de shunt S : il suffit de 5 ohms.

Le galvanomètre doit être à lecture directe et non à réflexion.

La résistance des conducteurs qui relient les divers instruments sera négligeable : on emploiera très avantageusement de larges bandes de cuivre rouge, fixées à demeure sur la table.

Manuel opératoire.

1° Le rhéocorde présentant sa résistance maximum, et le pont AB n'étant pas fermé, on règle la dérivation du galvanomètre de manière à avoir une déviation δ d'au plus 30° : on la note avec soin, ainsi que la longueur b du rhéocorde.

2° On introduit par le shunt S une dérivation de résistance s. La déviation galvanométrique diminue; on la ramène à sa valeur primitive en diminuant le fil du rhéocorde qui marque, par exemple, b'.

Résultats.

Cette manipulation exige quelques minutes; elle est d'une exécution très facile et donne de bons résultats. Voici, d'après M. Mouton, une détermination faite sur un élément Daniell, moyen modèle, rempli aux $\frac{2}{3}$ avec des dissolutions de sulfate de zinc et de sulfate de cuivre.

Il emploie un rhéocorde de Pouillet à fil de platine de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre; le shunt du galvanomètre est formé de $0^m,015$ de fil de cuivre de $0^m,001$ de diamètre; enfin s est égal à une unité Siemens.

$$b = 1000,$$
$$\delta = 59°,$$
$$s = 1 \text{ siemens},$$
$$\delta' = 40°,$$
$$b' = 185,$$
$$R = 1 \frac{1000 - 185}{185} = 4^{\text{siem}},4 = 4^{\text{ohms}},2.$$

Dans ce calcul, M. Mouton n'a pas tenu compte de la résistance G du galvanomètre.

Le même physicien a trouvé, pour une pile Bunsen, $13^m,49$ de fil français, soit $0^{\text{ohm}},125$, alors que l'élément était monté

lepuis une heure environ. Mais rien n'est plus variable que cette résistance, qui dépend des dimensions des électrodes, de eur position relative, de leur surface immergée, de la concentration des liquides, etc.: les chiffres que l'on produit dans es Traités spéciaux n'ont donc rien d'absolu et ne peuvent donner qu'une simple indication. Cette remarque s'applique évidemment au Tableau suivant :

Résistance intérieure des piles.

ÉLÉMENT.	FORME.	HAUTEUR.	R EN OHMS.	OBSERVATEUR.
Daniell.......	Rond.	mm 200	2,80	Reynier.
»	»	60	0,90	Beetz.
Grove........	»	220	0,26 à 0,45	Beetz.
Bunsen	Rond.	200	0,24	Reynier.
»	Rectangulaire.	200	0,06	»
Reynier......	Rectangulaire.	200	0,075	»

D'après les dernières recherches faites au Conservatoire, la résistance d'un élément Faure de 43^{kg}, liquide compris, serait de $0^{ohm},006$ au commencement de la décharge; mais cette résistance varie rapidement, par suite de certains phénomènes de polarisation.

LXIVe MANIPULATION.

MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES PAR LA MÉTHODE DE POGGENDORFF ET BOSSCHA.

Théorie.

La pile doit être considérée comme une véritable machine qui maintient, entre ses pôles, une différence constante de potentiel; cette différence mesure sa force électromotrice.

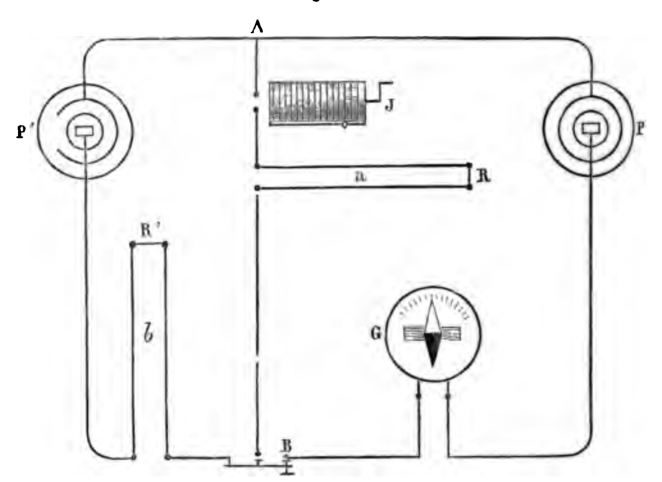
On peut la déterminer directement à l'aide de potentiomètres ou d'électromètres, ainsi que nous l'avons fait dans la LIIIe manipulation.

Mais il est plus facile de comparer, par *compensation* ou *opposition*, l'élément de pile à un étalon dont la différence de potentiel est connue : c'est le procédé que nous emploierons d'abord.

Parmi toutes les méthodes devenues classiques, nous donnons la préférence à celle de Poggendorff, modifiée par M. Bosscha, parce qu'elle est indépendante des effets de la polarisation et n'exige pas la détermination préalable de la résistance intérieure de l'élément.

Nous nous proposons de mesurer la force électromotrice x de l'élément P (*fig.* 101) en fonction de celle de l'étalon P',

Fig. 101.



qui est égale à E. On forme, avec la pile P et un galvanomètre G, un circuit qui se bifurque en deux autres AP'R'B et AJRB, contenant : le premier, l'élément-type P' et un rhéocorde R'; le second, un rhéostat J et un rhéocorde R. Les deux courants étant dirigés en sens contraire, on pourra toujours, en faisant varier la résistance du rhéostat, amener à zéro l'aiguille du galvanomètre; mais qu'on introduise alors par le rhéo-

de R une résistance a dans le circuit dérivé ARB, il faudra, ır ramener le galvanomètre au zéro, augmenter de b la réance du second circuit AP'R'B. Cette condition exprimée ébriquement, d'après les lois de Kirchhoff, conduit à la forle

$$x = E\frac{a}{a+b};$$

ıt b sont à déterminer (¹).

Description.

Le circuit, formé de gros fils ou mieux encore de bandes de ton, est fixé sur une table d'environ $1^m,10$ sur $0^m,80$, sur juelle les rhéocordes, le rhéostat et le galvanomètre sont ıblis à demeure.

Les rhéocordes de Pouillet sont connus : il importe qu'ils ient tous deux absolument identiques, de manière que les ngueurs a et b représentent bien les résistances respecıes introduites dans les circuits dérivés. Les contacts du cur-ur seront contrôlés avec soin.

Le meilleur rhéostat est celui de Jacobi : il n'est point sujet ıx défauts de contact et permet d'employer un fil d'argent ès fin, sans devenir trop délicat; à cet égard, il l'emporte de ıaucoup sur le rhéostat de Wheatstone, pour l'usage des la-ıratoires d'enseignement.

Il faut un galvanomètre très sensible : on emploie généraleent celui de sir W. Thomson, à réflexion, non astatique, et ı l'installe à côté de l'observateur, la mire en face de lui, ımme il a été dit ci-dessus (²).

Normalement le circuit est ouvert; il ne doit rester fermé ıe durant un temps très court. Ce résultat est obtenu par ıe manette à ressort, analogue au manipulateur de Morse, ıi est placée en B, à la croisée des fils : en l'abaissant par la

---

(¹) Cette méthode diffère uniquement de celle de Poggendorff en ce qu'elle exige pas la connaissance de la résistance intérieure de la pile; elle a été posée dans les *Annales de Poggendorff*, XCIV, p. 172; 1855.

(²) *Voir* la LXI[e] manipulation.

pression de la main, la fermeture a lieu; le double courant circule dans le circuit et l'aiguille du galvanomètre se met en mouvement, à moins que la compensation ne soit réalisée. L'opérateur abandonne aussitôt la manette, et le circuit est interrompu.

Il nous reste à décrire l'étalon unité. On avait adopté autrefois l'élément Daniell, monté au sulfate de zinc et au sulfate de cuivre, qui vaut $0^{volt},955$; ce couple était considéré comme très constant. On a reconnu cependant qu'il varie de 5 à 7 pour 100, sans cause appréciable, et qu'il subit en outre très irrégulièrement l'influence de la température. L'étalon de M. Latimer-Clark ne présente pas cet inconvénient; à $15°,5$, il possède une force électromotrice égale à $1^{volt},457$, à $\frac{1}{1000}$ près; la température croissant, il perd $0^{volt},006$ par degré. Dans cette pile, l'élément positif est constitué par du mercure pur, couvert d'une pâte de sulfate de mercure, Hg^2O, SO^3 (¹), dissous à la température de l'ébullition dans de l'eau complètement saturée de sulfate de zinc; un morceau de zinc chimiquement pur repose sur la pâte et forme l'élément négatif. Le circuit ne doit jamais rester fermé sur cette pile.

Il est absolument nécessaire que la pile P ait une force électromotrice moindre que celle de l'étalon ; un essai préalable est quelquefois nécessaire pour s'assurer que cette condition est remplie. On y procède en opposant pôle à pôle les deux éléments dans un circuit traversant un galvanomètre : l'aiguille doit être déviée du même côté que si l'étalon était seul, sinon il faudrait assembler en série deux ou plusieurs piles pour former des multiples de l'étalon.

Manuel opératoire.

1° L'élément à étudier et l'étalon sont joints en opposition.

2° Le rhéostat et les rhéocordes étant au zéro, l'opérateur appuie la main sur la manette; un instant très court suffit pour

(¹) Le sulfate de mercure est blanc, presque insoluble : on l'obtient en chauffant du mercure dans de l'acide sulfurique au-dessous de son point d'ébullition. Ce sel, additionné d'eau, ne doit pas donner de coloration au liquide; s'il devenait jaune, on conclurait à la présence de sulfate de peroxyde

que l'aiguille soit déviée; on remarque le sens et l'amplitude de l'écart, puis on introduit une résistance par le rhéostat, et l'on fait un nouvel essai. Si la déviation est moindre, mais de même sens, il faut poursuivre l'enroulement sur le rhéostat; sinon, on diminuerait la résistance.

3° La réduction à zéro étant obtenue, on donne au rhéocorde R une longueur *a* : il en résulte un certain écart au galvanomètre.

4° On ramène l'aiguille au zéro en donnant au rhéocorde R′ une résistance *b*.

a et *b* sont les éléments de la mesure à effectuer.

Résultats.

Cette méthode se prête à la détermination exacte des forces électromotrices et à l'étude des lois qui les régissent. Elle permet encore d'analyser les effets de polarisation, en mesurant les différences de potentiel d'un élément fermé sur lui même après un temps plus ou moins considérable.

Voici, d'après les derniers travaux des électriciens, les forces électromotrices des piles les plus usitées.

NOMS des éléments.	MÉTAL électro-positif.	LIQUIDE excitateur.	ÉLECTRODE conductrice.	CORPS dépolarisant.	E en volts.
Daniell.....	Zinc amalgamé.	$SO^3,HO = 1$ / $HO = 12$	Cuivre.	CuO, SO^3	0,978
»	»	»	»	CuO, AzO^5	1,000
Reynier.....	»	NaO, HO	»	CuO, SO^3	1,350
Grove.......	»	$SO^3,HO = 1$ / $HO = 12$	Platine.	AzO^5, HO	1,810
Bunsen......	»	»	Charbon.	»	1,964
Poggendorff..	»	»	»	Mélange chromique.	2,028
Cloris-Baudet	»	»	»	»	2,000
Marié-Davy..	»	»	»	Hg^2O, SO^3	1,524
Warren de la Rue.......	»	AzH^4Cl	Argent.	$AgCl$	1,059
Leclanché...	»	»	Charbon.	MnO^2	1,481

Pile secondaire de Planté.............		2,20 à 2,80
» de Faure....................		2,165
Pile thermo-électrique de Bunsen..	Bi ; 2 Sb ; Sn	0,110
» Clamond	Zn ; Sb ; Fe	0,036

LXVe MANIPULATION.

MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES PAR L'ÉLECTROMÈTRE CAPILLAIRE.

Théorie.

Ermann et Draper avaient démontré qu'une colonne de mercure de très faible diamètre, dont le ménisque terminal est en contact avec de l'eau acidulée, se déplace sous l'influence d'un courant électrique. M. Lippmann publia, en 1873 (1), une savante étude de ces phénomènes électrocapillaires et il imagina un électromètre d'une sensibilité extrême, dont l'emploi est particulièrement commode pour la détermination des forces électromotrices.

Description.

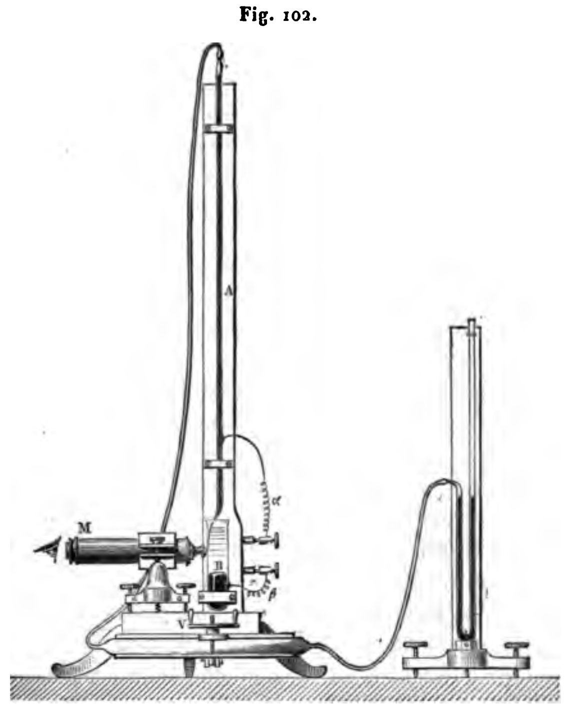
Un tube de verre A (*fig.* 102) de 1^m de hauteur et $0^m,007$ de diamètre environ, ouvert aux deux bouts, est soutenu verticalement par un support à trois pieds : l'extrémité inférieure de ce tube est capillaire et d'un diamètre de quelques millièmes de millimètre environ. Cette pointe effilée plonge dans de l'acide sulfurique étendu au $\frac{1}{6}$ en volume ; du mercure remplit le fond du vase B. La colonne mercurielle du tube commu-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, V, p. 494.

par un fil avec la borne α; le mercure B est relié à
ne β par un conducteur qui ne touche pas l'eau aci-

ɔointe capillaire vient s'appliquer contre la paroi du
ꞁ, à portée du microscope M, qui grossit 250 fois : ce
ꞁcope est pourvu d'un micromètre oculaire. Pour obtenir

Fig. 102.



ıage nette, il faut que son axe soit bien perpendiculaire
roi du verre. La mise au point se fait par les vis calantes
d du microscope : un fort ressort à boudin tend à le
cher du tube B.

ıac de caoutchouc allongé, à paroi épaisse, contient de
ıi exerce sa pression au-dessus du mercure A par l'in-
liaire d'un tuyau flexible : on modifie cette pression à
ɛ en agissant par la manivelle V sur une presse à vis; un

manomètre à air libre, placé à côté de l'appareil, permet d'apprécier la tension à $0^m,001$ près.

La colonne A est assez haute pour que le mercure pénètre par sa propre pression dans la pointe capillaire. M. Lippmann lui donne $0^m,750$; cette colonne est soutenue par la pression capillaire du ménisque qui se forme dans la pointe.

Réglage et graduation de l'instrument. — Après avoir rempli l'appareil, on chasse la bulle d'air restée dans la pointe capillaire, en exerçant une pression au-dessus de A, de façon à faire couler un peu de mercure; pendant cette opération, on met les bornes α et β en communication métallique. Cela fait, on rétablit la pression atmosphérique au-dessus du mercure A. Le ménisque M s'arrête alors dans une position d'équilibre déterminée, qui est le zéro de l'électromètre. On dispose donc le microscope de manière à amener l'origine des divisions de son micromètre à être tangente au ménisque, et le réglage est dès lors effectué. Il est vrai que ce zéro n'est pas toujours fixe après cette première opération, mais il le devient au bout de quelques jours.

Les forces électromotrices se mesurent par les pressions qu'il faut exercer en A pour ramener le ménisque au zéro, après qu'il a été déplacé par un courant. Une Table ou une courbe de conversion est donc nécessaire; on l'établit de la manière suivante.

Il s'agit d'obtenir d'abord, entre les bornes α et β, une différence de potentiel connue : pour cela, on dispose, en dehors de l'appareil, un circuit métallique, composé d'une résistance fixe R très considérable et d'une résistance variable ρ, parcouru par le courant d'un daniell chargé au sulfate de zinc dont la résistance est égale à r; puis on relie α et β à deux points u et v de ce circuit, séparés par la résistance ρ, u étant pris entre le pôle zinc et le point v. On a alors, pour valeur de la différence de potentiel e,

$$e = \frac{\rho}{R + r + \rho}.$$

r est la résistance intérieure de l'élément; on admet que ses variations sont négligeables par rapport à R. Faisant croître ρ, on établit une série de valeurs différentes de e, pour

chacune desquelles on note la pression compensatrice correspondante, ce qui permet de dresser le Tableau ou de construire la courbe.

Or M. Lippmann a démontré que tous les électromètres sont comparables pour une même concentration de l'acide : ce Tableau est donc exact pour tous les instruments présentant même hauteur de la colonne mercurielle et même concentration de l'acide. Voici les nombres obtenus avec une colonne de $0^m,750$ et une eau acidulée au $\frac{1}{6}$ en volume.

e.	*p*.	*e*.	*p*.	*e*.	*p*.
0,016	15,0	0,197	148,0	0,833	356,5
0,024	21,5	0,269	188,5	0,900	358,5
0,040	40,0	0,364	235,0	1,000	353,0
0,109	89,0	0,450	270,5	1,333	279,0
0,140	111,0	0,500	288,0	1,713	128,0
0,170	131,0	0,588	314,0	2,000	94,0

e est exprimé en daniells et *p* en millimètres de mercure. Pour une hauteur de mercure H différente de 750^{mm}, il faudra multiplier les pressions compensatrices par le rapport $\frac{H}{750}$.

Le mercure se déplace d'une division du micromètre pour une force électromotrice égale à $\frac{1}{1680}$ de daniell, sous la pression atmosphérique.

Manuel opératoire.

Avant de procéder à aucune mesure, il faut faire osciller la colonne mercurielle à l'aide de la vis V, car l'électromètre ne fonctionne bien que lorsque son tube est parfaitement mouillé par l'eau acidulée.

On mettra toujours le pôle négatif des éléments en communication avec la borne α, qui est au contact du mercure du tube.

I. *Forces électromotrices moindres que $\frac{1}{60}$ de daniell.* — On relie la source aux bornes α et β et on laisse la pression constante : le ménisque se déplace de *n* divisions dans le champ

du microscope. Or une division équivaut à $\frac{1}{1680}$ de Daniell; la force électromotrice cherchée est donc égale à $\frac{n}{1680}$.

Le microscope permettant d'évaluer un déplacement de $\frac{1}{6}$ de division, on en conclura que l'électromètre capillaire donne le $\frac{1}{10080}$ de daniell.

II. *Forces électromotrices moindres que* 1 *daniell.* — On fait communiquer le pôle négatif de la pile avec α, le pôle positif avec β; on tourne la manivelle V jusqu'à ce que le ménisque soit revenu au zéro et on lit au manomètre la valeur de la pression exercée.

La mesure est terminée : il n'y a qu'à chercher dans la Table la force électromotrice correspondante à cette pression.

III. *Forces électromotrices supérieures à* 1 *daniell.* — La sensibilité de l'électromètre décroît dès qu'on dépasse $0^{dan},9$; il convient donc de réduire la force électromotrice à mesurer. Pour cela, on oppose à l'élément étudié un ou plusieurs couples types, de manière à obtenir une différence moindre que $\frac{1}{2}$ daniell, ce qu'il est toujours possible de faire, car la force à évaluer est égale à un nombre entier de daniells, plus ou moins une fraction moindre que $\frac{1}{2}$.

La mesure s'effectue comme ci-dessus.

Résultats.

Les trois exemples suivants sont empruntés au Mémoire de M. Lippmann.

Mesure de la force électromotrice d'un élément zinc amalgamé, sulfate de zinc, zinc ordinaire:

$$E = 0^{dan},0081.$$

Mesure de la force électromotrice d'un Daniell monté à l'acide :

$$E = 0,939 \text{ de l'élément normal.}$$

Mesure de la force électromotrice d'un élément Leclanché. On l'oppose à un daniell, pôle charbon contre pôle cuivre,

zinc du daniell en communication avec β, le zinc du le-
ınché en communication avec α.

Pression compensatrice $= 270^{mm},5$.

Force correspondante $e = 0,450$;

ɔnc

1 leclanché $= 1^{dan},450$.

LXVIe MANIPULATION.

MESURE DES FORCES ÉLECTROMOTRICES EN VALEUR ABSOLUE. OU INVERSEMENT : MESURE DE LA COMPOSANTE HORIZONTALE DE L'INTENSITÉ MAGNÉTIQUE TERRESTRE.

Théorie.

Nous avons déjà vu que le volt est la force électromotrice ou différence de potentiel qui, aux extrémités d'un fil ayant une résistance de 1 ohm, produit un courant de 1 ampère.

Il résulte de cette définition une méthode de détermination des forces électromotrices en unités absolues, à condition toutefois que l'influence de la résistance intérieure du couple soit éliminée. Ce résultat peut être obtenu à l'aide d'un rhéomètre dont le cadre porte un fil d'une résistance assez considérable pour que celle du générateur soit négligeable : ainsi M. Gaiffe a construit des galvanomètres de 3000 ohms de résistance qui sont gradués en volts. Ces instruments permettent de déterminer par simple lecture, à $\frac{1}{100}$ près, une force électromotrice comprise entre 0,1 et 150 unités.

M. Marcel Deprez a proposé aussi un *volt-mètre* à fil fin, formé de bobines associées en tension, qui permet de mesurer très facilement la différence de potentiel existant entre deux points d'un circuit.

Cet instrument se place toujours en dérivation ; il ne change

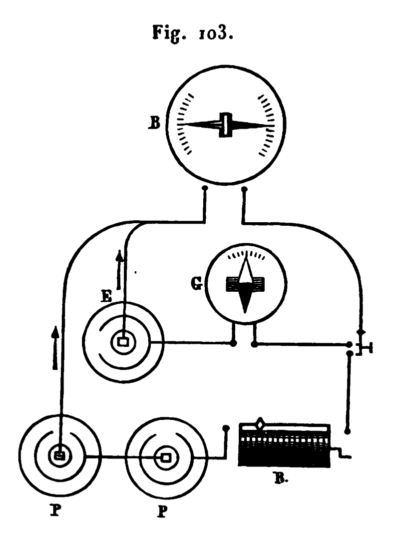
donc pas sensiblement le courant à mesurer, puisqu'il n'en dérive qu'une faible partie, par suite de sa grande résistance.

Mais ces instruments paraissent répondre à des exigences plus industrielles que scientifiques.

M. Latimer-Clark a indiqué un procédé plus correct, par lequel on évite de faire produire aucun travail à l'élément considéré.

Le diagramme ci-contre (*fig.* 103) indique la disposition de

Fig. 103.



l'expérience. B est une boussole des tangentes ; le couple à étudier est en E : il communique par un galvanomètre G avec les deux bornes de l'instrument de mesure ; une pile auxiliaire PP est en communication avec les mêmes pôles, de manière à y envoyer un courant de même direction.

On règle l'intensité de ce courant auxiliaire, soit en variant le nombre des éléments, soit en introduisant une résistance par le rhéostat R, de manière à contrebalancer la force du couple E et à amener au zéro l'aiguille du galvanomètre G ; les extrémités du fil de la boussole sont dès lors maintenues à une différence de potentiel égale à la force électromotrice

couple E, mais le courant qui traverse cette boussole est ırni par la pile auxiliaire (1).

Il suffit de connaître la résistance R de cette boussole et de terminer l'intensité I du courant en unités absolues, car on $E = IR$: on se rappellera qu'un ampère vaut 10^{-1} unités solues.

Il est peut être superflu de faire remarquer au lecteur que valeur T de la composante horizontale de l'intensité magnéque terrestre doit être connue comme pour calculer le coefcient de réduction de la boussole, ainsi que nous l'avons vu ans la LX[e] manipulation.

C'est assurément le plus grand inconvénient de cette méhode : mais il en ressort l'avantage de pouvoir déduire la aleur de T de cette même expérience, en opérant sur un ouple de force électromotrice connue.

Description.

Tous les instruments nécessaires à cette manipulation ont té décrits précédemment.

Manuel opératoire.

1° On amène l'aiguille du galvanomètre au zéro en dérouant une longueur de fil déterminée au rhéostat.

La fermeture du courant s'opère par une manette à double ontact ou plus simplement par un pont qui relie des godets leins de mercure. On évitera de laisser le courant fermé, ar il s'affaiblirait par le travail intérieur.

2° On lit à la boussole la déviation φ et on calcule I : pour instrument décrit et étudié dans la LX[e] manipulation, nous urions

$$I = 0{,}0419 \operatorname{tang} \varphi.$$

3° La résistance de la boussole étant calculée ou mesurée, n en déduit

$$E = IR.$$

---

(1) *Journal de Physique*, II, p. 358; 1873.

Résultats.

C'est par cette méthode que M. Latimer-Clark a mesuré la force électromotrice de son élément type : la moyenne de trente et une observations a été de

$1^{volt},45678.$

De zéro à 100°, l'élément donna des valeurs relatives de 0,9993 et 0,9412, ce qui implique une décroissance de 0,06 pour 100 par degré.

La connaissance de ces nombres et la remarquable constance de ce couple permettent de faire servir l'expérience qui précède à la mesure de la composante horizontale du magnétisme terrestre en un point et à un moment donné.

CHAPITRE XII.

INDUCTION.

LXVIIe MANIPULATION.

ÉTERMINATION DES COEFFICIENTS D'INDUCTION SPÉCIFIQUES PAR LA BALANCE DE M. HUGHES.

Théorie.

Deux bobines étant placées l'une contre l'autre, si l'on en-)ie à travers l'une d'elles un courant intermittent, un courant ›ra induit dans l'autre à chaque interruption, et il fera parler n téléphone intercalé dans le circuit. Mais ce téléphone res- ›ra muet lorsqu'on accouplera deux groupes de bobines lentiques sur lesquelles le fil sera enroulé en sens contraire. Cependant, le silence étant obtenu, on pourra rendre la pa-)le à ce téléphone en disposant au centre d'une des bobines n noyau métallique : le résultat dépendra des propriétés ectriques du métal.

Pour apprécier l'accroissement du son, M. Hughes adjoint son ingénieuse balance un sonomètre, à l'aide duquel il me- ıre les effets produits et classe les métaux dans un ordre dé- rminé, en attribuant à chacun d'eux un coefficient parti- lier, appelé le *coefficient d'induction spécifique*.

Description.

La *fig.* 104 représente l'appareil complet muni de l'inter- pteur et du sonomètre; la *fig.* 105 est une coupe verticale

faite par l'axe des bobines, et la *fig.* 106 donne par le détail la disposition des disques, spirales, godets et autres accessoires dont s'est servi M. Hughes dans ses expériences devenues classiques.

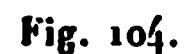
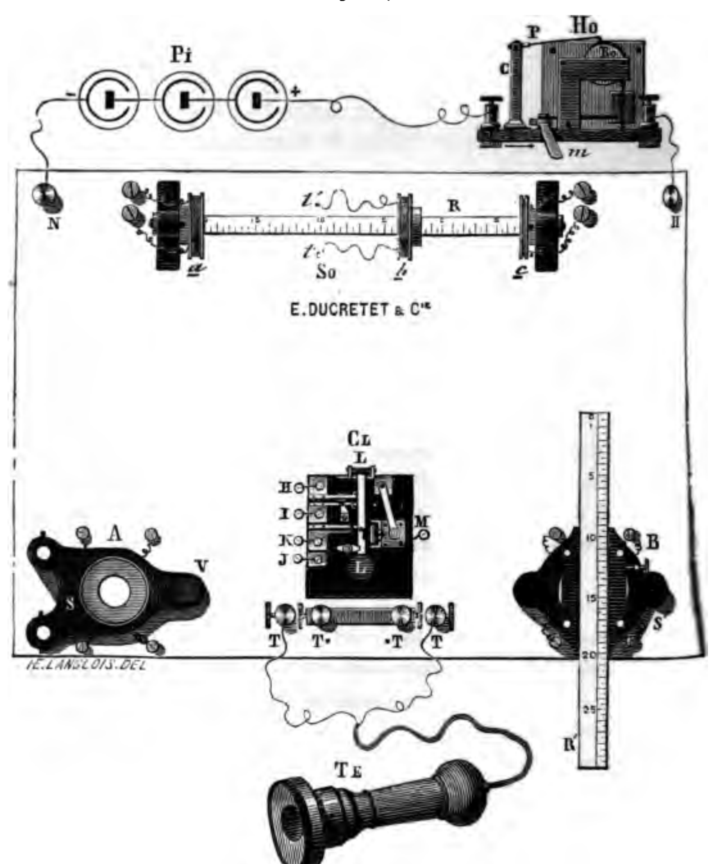


Fig. 104.

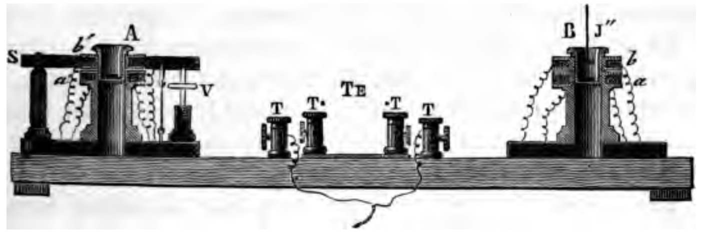


On voit en A et en B les deux groupes formés chacun d'une bobine inductrice *a* ou *a'* et d'une bobine induite *b* ou *b'*. Le courant est fourni par 3 éléments Daniell Pi et il est interrompu par une roue dentée mue par un mouvement d'horlogerie Ho; cette roue ouvre et ferme successivement le circuit

des bobines inductrices. Telle est la balance construite par MM. Ducretet et Cie, à qui nous devons ces dessins (¹).

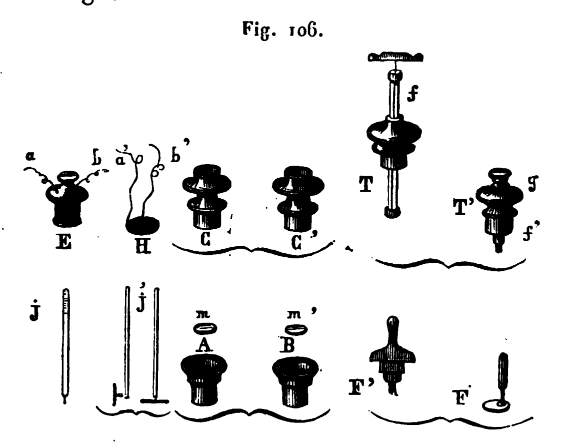
Fig. 105.





Bien que les deux groupes soient aussi identiques que possible, le téléphone ne reste pas toujours silencieux, et il faut agir sur la vis V pour obtenir ce résultat, en rapprochant b' de a' ou l'éloignant.

Fig. 106.



Le sonomètre So est un inductomètre composé de trois bobines verticales : les deux extrêmes sont parcourues par le courant en sens contraire, et elles sont fixes; la bobine moyenne glisse sur une règle horizontale et elle est rattachée

(¹) *Journal de Physique*, IX, p. 376 (1880), et *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, t. XIX, p. 561 (1880) : ces deux articles sont de M. Bertin, qui a fait une étude spéciale de la balance.

au téléphone. Pour une certaine position de la bobine induite, l'action est nulle et le téléphone muet; on marque o en ce point; si l'on éloigne la bobine *b* du zéro, le son se reproduit plus ou moins fort et son intensité peut être indiquée par la division à laquelle la bobine s'est arrêtée.

La clef Cl permet à volonté d'introduire dans le circuit la balance ou le sonomètre. En pressant sur le bouton L, le téléphone est relié au sonomètre; quand le bouton est relevé au contraire, c'est la balance qui fonctionne. La languette M sert à fermer le circuit au moment d'expérimenter.

Les métaux à comparer sont pris sous la même forme, celle de disques *m* et *m'* ayant la dimension d'un shilling. On les dépose dans le godet A de la balance. Il suffit d'un milligramme de cuivre ou d'un fil de fer plus fin qu'un cheveu pour que le téléphone rende un son nettement appréciable.

On augmentera considérablement la sensibilité de l'appareil en posant le mouvement d'horlogerie sur une serviette, pour amortir le bruit des rouages, qui peut couvrir celui qu'il s'agit de percevoir.

Manuel opératoire.

La méthode consiste à mettre un disque dans la balance et à comparer le son produit à celui que rend le sonomètre dans une position déterminée : en agissant sur la clef L, on entend successivement deux sons et on les rend égaux par un déplacement de la bobine du sonomètre.

Voici la suite des opérations à effectuer :

1° La languette M étant poussée sur le bouton métallique de gauche, on met l'horloge en marche et on rend le téléphone silencieux par la vis V.

2° Le disque est introduit en A : le téléphone donne un son; pressant alors sur le bouton L, l'opérateur fait parler le sonomètre, et il égalise les deux sons, en rapprochant ou éloignant la bobine C du zéro. Ce résultat obtenu, il note la division correspondante du sonomètre.

3° La même expérience est répétée sur divers métaux.

Résultats.

M. Hughes a dressé le Tableau suivant des coefficients d'induction spécifiques :

Argent	125
Or	117
Argent monnayé	115
Cuivre	100
Zinc	80
Étain	74
Fer	45
Plomb	38
Bismuth	10
Charbon des cornues	2

Ces mesures sont assez difficiles, parce que les sons à comparer n'ont pas la même hauteur.

On peut se rendre compte de cette différence d'effets, en essayant tour à tour le fer et l'acier : le premier donne un son sourd et étouffé ; le second, au contraire, produit une sorte de chant extrêmement aigu.

Ces expériences présentent le plus haut intérêt, parce qu'elles permettent de faire une application immédiate des lois de l'induction. En opérant sur une masse de fer ou sur un paquet de fils, on constate très nettement l'action bien connue des diaphragmes.

LXVIIIe MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA MACHINE DE GRAMME.

Théorie.

Ce générateur d'électricité se compose de deux organes essentiels : l'un, formé d'aimants ou d'électro-aimants fixes, dé-

termine un champ magnétique constant; l'autre, constitué par un anneau de fer doux, autour duquel est enroulée une hélice de fil de cuivre, tourne sur lui-même entre les pôles de l'aimant.

L'hélice est le siège de courants induits que l'on recueille par un certain nombre de collecteurs, sur lesquels appuient deux balais flexibles. Ces courants étant continus, il n'est pas nécessaire de les redresser.

Il y a à considérer dans une machine de Gramme l'intensité du champ, la vitesse de rotation et les résistances intérieure et extérieure : son action est définie par sa force électromotrice et l'intensité du courant.

On démontre que la force électromotrice est proportionnelle, toutes choses égales d'ailleurs, à l'intensité magnétique du champ dans lequel a lieu le mouvement de l'anneau; d'autre part, elle est proportionnelle à la vitesse, en dessous d'une limite déterminée, et indépendante de la résistance extérieure.

Nous nous proposons de demander à l'expérience la confirmation de ces lois, formulées par la théorie.

Description.

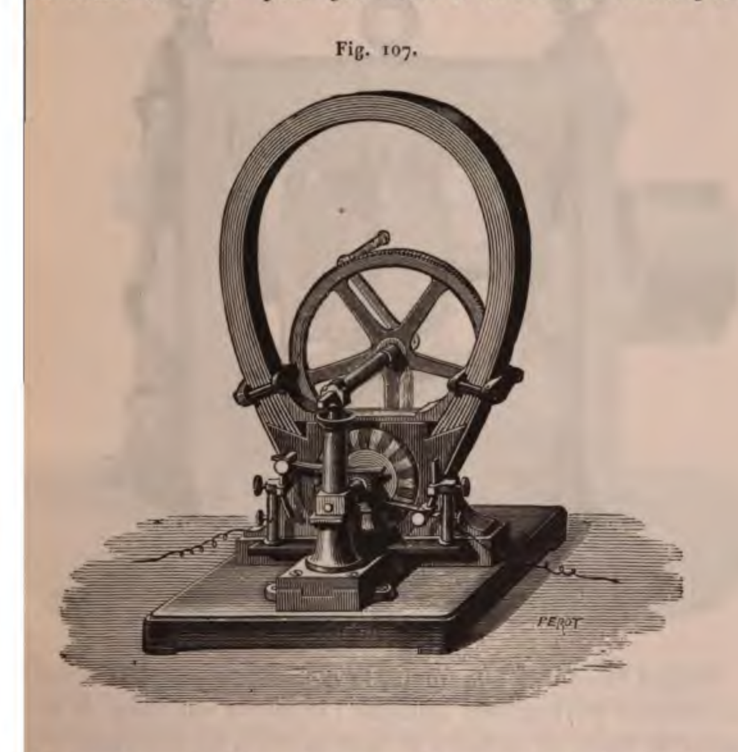
La *fig.* 107 représente une machine de laboratoire à aimant Jamin. Elle se meut à la main : on obtient facilement une rotation très rapide, de 600 tours à la minute, à l'aide d'un jeu de roues dentées de diamètres très différents. Au besoin une poulie peut être montée sur l'axe et le mouvement donné par transmission mécanique.

On trouve aussi dans les laboratoires la machine dynamo-électrique de Gramme, dans laquelle on a substitué à l'aimant fixe un système d'électro-aimants alimentés par le courant de la machine elle-même (*fig.* 108). L'anneau construit à la manière ordinaire tourne entre les plaques polaires de fer doux et reçoit son mouvement par une courroie de transmission passant sur une poulie portée par l'axe de l'anneau.

Le premier modèle peut produire des effets électriques équivalents à ceux que produiraient 8 éléments Bunsen; sa

orce électromotrice ne dépasse guère 15 volts. Le second ype a une force électromotrice beaucoup plus considérable, l'environ 80 volts : il dépense 150^{kgm} pour une vitesse de 20 tours et 225^{kgm} pour 900 tours à la minute. Il est peu

Fig. 107.



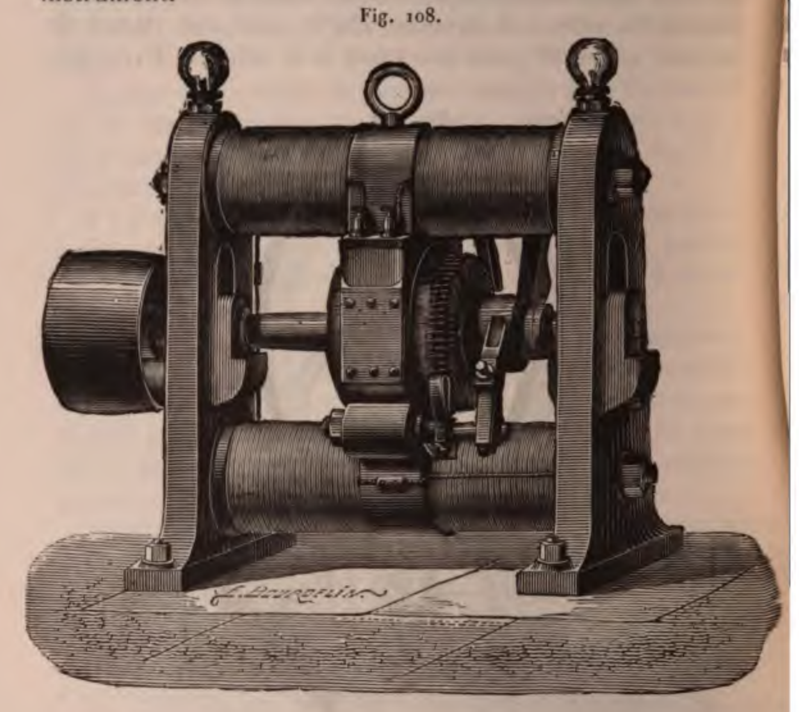
de laboratoires de Facultés qui ne disposent pas d'un moteur à gaz de cette force.

Pour procéder à l'essai de ces machines, il faut disposer la transmission de manière à pouvoir déterminer exactement le nombre de tours de l'anneau induit. On peut le calculer, car il est fonction du nombre de tours du moteur : mais il est préférable de le mesurer directement, attendu que le glissement les courroies introduit une cause d'erreur très grave.

La meilleure méthode consiste à employer un compteur de ours dont on appuie la pointe sur le premier axe du générateur; la vitesse observée, étant tout au plus égale au sixième

de celle de l'anneau, peut être relevée fort exactement par cet instrument.

Fig. 108.

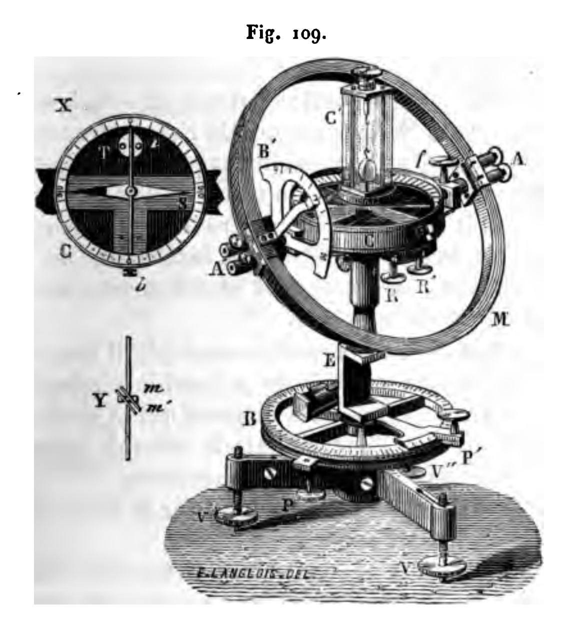


Quand on tourne à la main, la détermination de la vitesse de rotation devient fort indécise : le mieux est alors de mesurer la durée de 20 tours de la manivelle, en admettant que le mouvement soit uniforme.

L'intensité du courant fourni par le générateur se mesure par une boussole des tangentes, ou mieux encore par celle des cosinus connue sous le nom d'Obach (*fig.* 109), véritable boussole des tangentes dont le cadre vertical est mobile autour de son diamètre horizontal et peut s'incliner plus ou moins sur le plan de l'aiguille. La déviation pour une intensité donnée est proportionnelle au cosinus de l'angle du cadre avec la verticale et, par suite, diminue quand cet angle croît. MM. Ducretet et Cie construisent cet instrument sur le modèle de la *fig.* 109; le cercle gradué B′ permet d'évaluer l'inclinaison

du cercle M, et de rendre comparables les mesures faites avec des inclinaisons différentes. La gorge du multiplicateur contient deux fils parallèles et de plus une large bande de cuivre rouge épais qui peut sans danger être ouverte au courant le

Fig. 109.



plus intense. Un système de deux miroirs m et m' fixés sur le barreau aimanté sert aux mesures précises, soit par projection avec le miroir concave m, soit par réflexion avec le miroir plan m'. Ces miroirs sont mobiles et peuvent être placés dans différentes directions [1].

---

[1] Séance du 16 avril 1880 de la Société française de Physique. Ces instruments permettent de mesurer des courants variant de $\frac{1}{20}$ à 100 ampères, au témoignage de M. le capitaine Renard, qui a fait une étude spéciale d'une boussole fournie par MM. Ducretet et Cie, au Ministère de la Guerre. En appelant θ l'inclinaison du circuit sur le plan d'oscillation de l'aiguille et φ la déviation, l'intensité du courant est donnée en ampères par la formule

$$i = A \frac{\tang\varphi}{\cos\theta},$$

dans laquelle A est un paramètre variable avec le circuit, égal à 14,15 ou 1,127,

On peut encore employer très avantageusement le galvanomètre à arête de M. Marcel Deprez : c'est un *mesureur de courant* tout à fait pratique, composé d'un aimant en fer à cheval et de 18 petites aiguilles en fer doux, qui sautent brusquement à leur position d'équilibre aussitôt que le courant passe; on étalonne cet instrument par comparaison avec un instrument absolu.

Le même physicien a aussi construit un *ampère-mètre*, en collaboration avec M. Carpentier. Ce rhéomètre, dont la résistance est d'au plus $0^{ohm},02$, ne modifie pas l'intensité du courant dans lequel on l'introduit : on ne doit jamais le placer en dérivation. Il se prête à la mesure directe de 70 ampères; mais la maison Bréguet ajoute à cet instrument un shunt qui permet de mesurer des intensités supérieures à 200 ampères, sans qu'on risque de le brûler.

Quel que soit le galvanomètre employé, il faut avoir soin de l'éloigner le plus possible de la machine, afin de le soustraire à l'action énergique des aimants qui le composent : le mieux est d'installer l'instrument de mesure dans une salle voisine de celle où fonctionne le générateur.

Deux procédés permettent de mesurer la force électromotrice d'un générateur.

Le premier consiste à opposer directement à la machine une pile d'un certain nombre d'éléments et à chercher quelle est la vitesse nécessaire pour en annuler le courant : la force électromotrice cherchée est alors égale à celle des éléments types.

Le second est un procédé de compensation.

Dans le circuit MAEGBM de la machine (*fig.* 110), on introduit un ou plusieurs éléments E et un galvanomètre G; puis, entre les points A et B on jette un pont dont on modifie la résistance jusqu'à ce que le galvanomètre soit réduit au zéro. Appelant R la résistance du circuit AMB, λ celle du pont, E la force électromotrice de la pile auxiliaire et x la force électromotrice cherchée de la machine, on peut écrire, par

suivant que le courant traverse la bande métallique ou les fils qui sont enroulés sur le cadre. Ces chiffres correspondent au modèle courant de la maison Ducretet, qui a figuré à l'Exposition d'Électricité de 1881.

application des lois de Kirchhoff, en désignant par I l'intensité du courant principal ([1]),

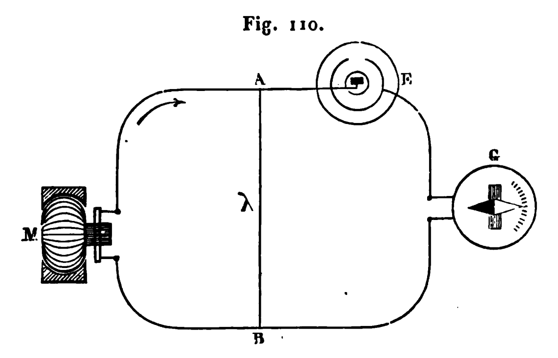
$$x = (R + \lambda) I \quad \text{et} \quad E = \lambda I,$$

d'où

$$x = \left(1 + \frac{R}{\lambda}\right) E.$$

On augmente d'une façon continue la résistance λ du pont au fur et à mesure que, la vitesse croissant, la force électromotrice varie, et l'on parvient rapidement à dresser un Tableau des forces électromotrices en fonction des vitesses de rotation.

Fig. 110.



En supprimant successivement quelques lames d'acier de l'aimant, on modifie l'intensité du champ, et l'on détermine son influence sur le rendement de l'électromoteur.

Manuel opératoire.

Les détails qui précèdent sont assez précis pour nous dispenser de décrire les diverses opérations que nécessite l'essai d'une machine de Gramme : on peut du reste les varier à l'infini, ainsi qu'il ressort de l'exposé des résultats obtenus par les habiles physiciens qui se sont occupés de la question.

Résultats.

MM. Mascart et Angot ont publié dans le *Journal de Physique* ([2]) une série de recherches expérimentales sur les ma-

([1]) *Journal de Physique*, VII, p. 79 et 363; 1878.
([2]) *Journal de Physique*, VII, p. 363; 1878.

chines magnéto-électriques : nous leur empruntons les chiffres qui suivent.

Machine de Gramme à aimant Jamin.

Nombre de tours de l'anneau par seconde, n.	Nombre d'éléments Daniell en opposition, p.	Rapport $\frac{p}{n}$.
10,2	3	0,294
14,0	4	0,286
17,8	5	0,231
22,2	6	0,270
25,5	7	0,275
29,5	8	0,272
	Moyenne	0,270 daniell.
	»	0,258 volt.

Ces résultats sont assez concordants pour avoir suggéré l'idée d'employer une machine de Gramme pour déterminer la force électromotrice d'une pile par opposition : il n'y aurait qu'à compter le nombre de tours effectués par seconde.

Voici, pour une autre machine, la force électromotrice par tour d'anneau par seconde, pour des vitesses, des résistances et des intensités variables :

VITESSE.		RÉSISTANCE.		INTENSITÉ.	
Tours de l'anneau par seconde.	Force électromotr. en volts.	Résistance extérieure en ohms.	Force électromotr. en volts.	Intensité en ampères.	Force électromotr. en volts.
3,1	0,79	15	0,78	0,00025	0,74
3,6	0,82	44	0,82	0,00181	0,74
6,7	0,77	100	0,79	0,0230	0,77
9,1	0,77	200	0,77	0,056	0,81
15,4	0,75	1000	0,78	0,262	0,78
28,6	0,75	5000	0,74	0,742	0,78
43,5	0,74	10000	0,74		
50,0	0,75	20000	0,74		

MM. Mascart et Angot en ont conclu que la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse, tant que celle-ci ne

dépasse pas 50 tours de l'anneau par seconde et que l'intensité du courant est inférieure à $0^{amp},8$, quelle que soit la résistance extérieure.

En faisant varier le nombre des lames de l'aimant, les mêmes physiciens ont trouvé les forces électromotrices suivantes, pour un même nombre de tours :

	Force électromotrice en volts.
23 lames	0,260
15 lames	0,165
8 lames	0,0767

Les forces électromotrices sont sensiblement proportionnelles au nombre de lames; elles sont rigoureusement proportionnelles aux intensités du champ, déterminées par un procédé spécial que nous ne croyons pas devoir décrire ici, de crainte d'allonger outre mesure cette manipulation.

Quelle est la loi des intensités, alors qu'elles dépassent $0^{amp},8$?

MM. Mascart et Angot ont constaté que l'intensité croît moins vite que la vitesse de rotation : ce résultat pouvait être prévu par la théorie. Les différences restent légères avec un générateur de Gramme, mais, avec une machine de Clarke ou de l'Alliance, il est aisé de constater un maximum d'intensité pour une vitesse donnée; le courant diminue rapidement à partir de ce maximum, change même de signe et passe de nouveau par un maximum du côté négatif. On attribue ce curieux effet à un retard dans l'aimantation.

D'après MM. Meyer et Auerbach [1], les variations sont beaucoup moins marquées avec les machines dynamo-électriques. Le Tableau suivant résume une série d'expériences très soignées, entreprises par ces savants sur une machine dynamo-électrique de Gramme, construite à Paris par MM. Mignon et Rouart sur le modèle courant. n est le nombre de tours par minute et i l'intensité mesurée par une boussole des tangentes; on a fait simplement

$$i = \tang \varphi.$$

[1] *Annales de Wiedemann*, VIII, p. 494; 1879.

n.	*i.*
21	0,0061
42	0,0131
63	0,0224
83	0,0321
122	0,0585
166	0,121
236	0,584
342	1,66
557	3,15
642	3,56
876	4,50

Ces chiffres montrent que *i* croît d'abord proportionnellement à *n*, puis un peu moins vite ; pour des valeurs de *n* comprises entre 200 et 300, *i* redevient proportionnel, puis il croît de nouveau un peu moins vite ; enfin, pour les grandes vitesses, *n* est encore proportionnel à *i*. A la théorie de rendre compte de ces curieuses alternatives.

CHAPITRE XIII.

DE LA LUMIÈRE EN GÉNÉRAL.

Note sur les unités de lumière.

étalon le plus anciennement adopté est la bougie : c'est, 'rance, la bougie stéarique de l'Étoile; en Allemagne, a ;ie de paraffine et, en Angleterre, celle de blanc de baleine, lée *candle.*

ınité française, qui vaut environ 1,15 candle, correspond à consommation moyenne de 8^{gr} à l'heure; elle n'est pas :minée avec une rigueur absolue, parce que l'intensité de mière dépend de la forme et de la nature de la mèche et agitation plus ou moins grande de l'air. M. Schwendler re avoir constaté des variations de 50 pour 100.

I. Dumas et Regnault avaient choisi pour unité de lumière d'une lampe à huile d'Argand ou de Carcel de 23^{mm},5 amètre, surmontée d'une cheminée de 0^{m},290 de hauteur ^{m},047 de diamètre, le coude étant à 0^{m},007 au-dessus de èche : pour une hauteur de mèche de 0^{m},010, cette lampe : 42^{gr} d'huile de colza à l'heure. C'est l'étalon *Carcel,* qui vaut à 6,5 bougies françaises, 7,6 bougies de paraffine et :andles : on n'en emploie plus d'autres aujourd'hui pour ıesures photométriques.

Revue scientifique 25 février : 1882, *La Photométrie,* par M. Crova.

LXIXe MANIPULATION.

PHOTOMÉTRIE.

Théorie.

La photométrie a pour objet d'établir les rapports des intensités de diverses sources de lumière.

Elle est basée sur le principe que l'intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance, duquel découle immédiatement le corollaire suivant : si deux sources de lumière placées à des distances D et D' d'une surface y produisent le même éclairement, leurs intensités respectives I et I' sont proportionnelles aux carrés des distances :

$$\frac{I}{I'} = \frac{D^2}{D'^2}.$$

Il suffit donc que l'œil sache reconnaître qu'une surface reçoit de deux sources une même quantité de lumière pour que le rapport de leurs intensités soit déterminé par une simple mesure de longueur.

Description.

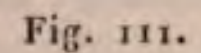
Parmi les nombreux photomètres en usage, ceux de Rumford, de Bouguer et de Foucault sont classiques. Ce dernier a été adopté par MM. Regnault et Dumas, pour la détermination quotidienne du pouvoir éclairant du gaz de la Compagnie parisienne : nous lui donnerons la préférence.

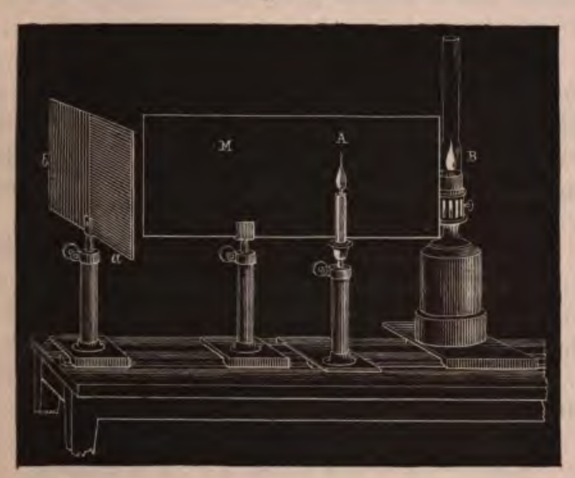
Une lame de carton M (*fig.* 111) est placée parallèlement au banc d'optique : *ab* est une plaque de verre sur laquelle on a déposé une couche de lait concentré par évaporation. Les lumières sont placées sur deux supports glissant le long de deux règles graduées parallèles au banc : on compare l'éclairement qu'elles produisent sur le verre des deux côtés du diaphragme.

La lame de verre est souvent placée au fond d'une caisse rec-

ulaire noircie intérieurement pour éviter toute réflexion lentelle.

la source lumineuse, comparée à la source unité, a une ısité très grande, comme l'arc voltaïque, par exemple, on ›bligé de l'éloigner considérablement; mais on peut éviter nconvénient en plaçant devant la source, comme l'ont fait


Fig. 111.



Ayrton et Perry, une lentille divergente qui, étalant la ière, réduit son intensité par unité de surface dans un ort connu.

ıand on se propose de comparer le pouvoir émissif de deux mes, il est nécessaire de les limiter par deux ouvertures es entre elles : c'est ce qu'on fait quand on veut comparer ımière émise par la Lune à celle d'une bougie, ou bien ıd on cherche à mesurer l'éclat intrinsèque du milieu ı flamme d'une lampe à pétrole à mèche plate en fonction elui de la même flamme vue par la tranche.

Manuel opératoire.

On intercepte la plus forte des deux sources et l'on ap- :he l'autre au point voulu pour que la plage qui lui cor-

respond ait un bon degré d'éclairement : on note alors la distance D de cette source.

2° On démasque la source la plus intense et on l'éloigne jusqu'à ce que l'œil juge les deux moitiés du verre illuminées du même éclat : la distance D′ est inscrite.

3° On change les deux sources de côté et on recommence la même opération pour calculer une moyenne définitive.

Résultats.

D'après M. Hirn (¹), la bougie stéarique étant prise pour unité, l'huile de colza donne, à égalité de poids d'huile et de stéarine, une lumière égale à 1,68; l'huile de pétrole, bouillant à 210°, fournit 2,79 unités dans les mêmes conditions.

Aux termes du cahier des charges de la Compagnie parisienne, le pouvoir éclairant du gaz doit être tel que, sous une pression de $0^m,002$ à $0^m,003$ d'eau, l'éclat d'un carcel puisse être obtenu avec une consommation de 105^{lit} par heure.

MM. Fizeau et Foucault ont donné l'échelle suivante des intensités de quelques sources lumineuses.

	Soleil = 100 = 5600 bougies à $0^m,30$ de distance.		
Arc voltaïque.	80 couples Bunsen..........	= 23,8 =	1332 bougies.
	40 »	= 13,6 =	762 »
	Lumière de Drummond......	= 0,7 =	39 »

MM. Auduin et Bérard ont démontré (²) que, pour les becs de gaz à fente dits *papillons*, la largeur de fente qui donne le maximum de pouvoir éclairant est de $\frac{7}{10}$ de millimètre : le bec annulaire exige la même épaisseur de fente.

Le pouvoir éclairant du gaz est maximum pour une pression de $0^m,002$ à $0^m,003$.

Les cheminées de verre, dont le diamètre diminue par une courbe graduée au-dessus de la flamme, donnent plus de lu-

(¹) Rapport fait à la Société industrielle de Mulhouse, cité par l'abbé Moigno dans les *Éclairages modernes*.

(²) *Annales de Chimie et de Physique*, 3ᵉ série, LXV, p. 423.

mière, toutes choses égales d'ailleurs, que celles dont le diamètre change brusquement.

Les appareils à plusieurs mèches concentriques, qu'on emploie pour les phares, donnent un rendement supérieur à celui des appareils simples; de même, l'intensité de deux bougies qui se touchent est plus grande que la somme de leurs intensités isolées.

D'après M. Cornu, l'éclat de la flamme d'une lampe à pétrole, vue de champ, est au moins dix fois supérieur à celui du milieu de la flamme, vue de face.

Nous donnons les résultats précédents comme exemples instructifs d'observation; le lecteur y trouvera les éléments d'une étude photométrique fort intéressante, qu'il pourra varier à son gré.

LXXe MANIPULATION.

MESURE DES INDICES DE RÉFRACTION PAR LE GONIOMÈTRE DE BABINET.

Théorie.

La méthode la plus simple et la plus parfaite consiste à mesurer la déviation minimum δ produite par un prisme dont l'angle réfringent est égal à A; l'indice n se calcule par la formule

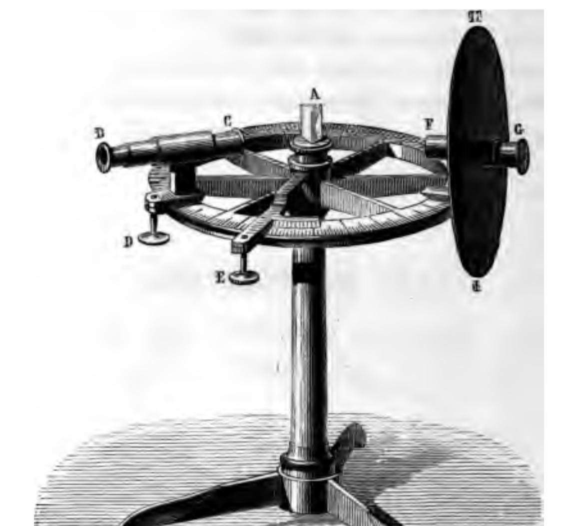
$$n = \frac{\sin\left(\frac{A+\delta}{2}\right)}{\sin\frac{A}{2}}.$$

Description.

On emploie généralement, dans les laboratoires de Physique, le goniomètre de Charles, modifié par Babinet.

Cet appareil se compose (*fig.* 112) d'un cercle horizontal gradué sur lequel se meuvent radialement une lunette à réticule BC et un collimateur FG. Une petite plate-forme circulaire placée au centre, parallèlement au plan du cercle, sert de support au prisme A : elle peut tourner sur elle-même librement ou par le mouvement que lui communique une ali-

Fig. 112.



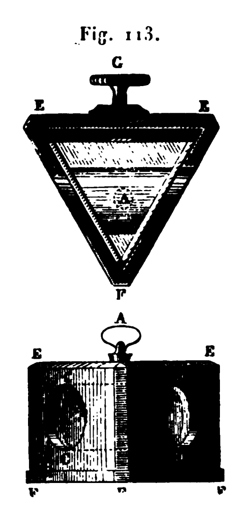
dade E munie d'un vernier qui mesure les degrés parcourus dans la rotation. Des vis de rappel, qui ne sont pas figurées sur le dessin, complètent les mouvements donnés à la main : les pièces mobiles sont rendues fixes par des pinces à serrage.

Un bon goniomètre permet d'apprécier des déplacements angulaires de 30″, et quelquefois même de 10″, suivant la dimension du cercle répétiteur; une approximation à la minute est du reste suffisante pour assurer l'exactitude de la quatrième décimale des indices de réfraction.

Les solides sont taillés sous forme de prismes d'un angle de 50° à 60° ; les liquides sont enfermés dans des prismes de verre creux fermés par des glaces à faces parallèles CC, DD (*fig.* 113) que l'on serre dans une enveloppe métallique au moyen d'une vis G; ce modèle est du meilleur usage. L'orifice A permet l'introduction du liquide.

La plate-forme destinée à porter le prisme est faite généralement d'une matière réfléchissante, très utile pour disposer l'arête réfringente normalement au plan du limbe ; quelquefois elle est pourvue de vis de réglage, qui ont pour objet de rétablir son parallélisme avec ce plan, dans le cas où il aurait été altéré.

Fig. 113.



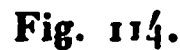
On emploie commodément, pour éclairer la fente, une lumière monochromatique, telle que la flamme d'une lampe à alcool salé, ou celle d'un brûleur à gaz avec filaments d'amiante sodé; on peut aussi se procurer une lumière simple (au moins relativement) en tamisant la lumière blanche à travers un milieu absorbant. Les verres colorés par le peroxyde de cuivre donnent une lumière verte; elle est rouge avec le protoxyde, bleue avec l'oxyde de cobalt, et violette avec l'oxyde de manganèse [1]. Brewster préférait, pour obtenir un rayon d'une réfrangibilité déterminée, l'oxalate double de chrome et de potassium; ce sel éteint toutes les couleurs du spectre, sauf une bande mince qui se trouve dans le rouge à une distance de la raie B égale au $\frac{1}{6}$ de l'intervalle qui sépare les raies A et B. Enfin une dissolution de

---

[1] Voici un excellent moyen de reconnaître si un verre coloré a les qualités désirées : dans le trajet d'un faisceau de lumière blanche on établit verticalement un prisme très réfringent derrière lequel on place l'œil, ce qui fait voir un spectre très dispersé. Alors on interpose, entre l'œil et le prisme, le verre que l'on veut éprouver : il doit réduire le spectre à une étendue très restreinte, ne comprenant que des réfrangibilités très peu différentes entre elles, sans intermittences. Ce procédé a été indiqué par Biot.

sulfate de cuivre ammoniacal donne une lumière indigo sensiblement homogène.

On éclaire encore fort bien le collimateur par un tube de Geissler contenant de l'hydrogène; il donne les raies bien connues Hα, Hβ et Hγ, qui coïncident avec les raies C, F et G.


Fig. 114.



Mais aucune source de lumière ne donne de résultats auss nets et aussi exacts que le Soleil, dans le spectre duquel on distingue fort aisément les raies A, *a*, B, C, D, E, *b*, E, G et H toutefois il est nécessaire de fixer la direction de ses rayon au moyen d'un héliostat.

C'est l'héliostat de Silbermann (*fig.* 114) qu'on trouve d'o dinaire dans les cabinets de Physique : voici de quelle m nière il convient de le régler.

1° L'horloge étant remontée et l'instrument calé horizontalement, on incline l'axe à la latitude du lieu et l'on serre la vis K.

2° On cherche l'heure vraie et l'on y amène l'aiguille C; le bouton D rend l'appareil solidaire du mouvement d'horlogerie.

3° On met le cercle C*s* au complément de la déclinaison ou à la date, qui est marquée sur une des faces.

4° Cela fait, l'opérateur tourne l'instrument sur sa base jusqu'à voir le rayon de Soleil passer de la pinnule *s* au centre de l'écran P; de la sorte, la connaissance exacte du méridien n'est pas nécessaire.

5° L'héliostat est dès lors réglé; il n'y a plus, pour diriger à volonté les rayons réfléchis, qu'à déplacer le limbe *rr'*, mobile dans sa coulisse, et à le faire tourner sur l'axe, en desserrant la vis E.

Les élèves ne pourraient éprouver d'autre difficulté que pour déterminer l'heure vraie : nous croyons nécessaire de leur rappeler à cette occasion quelques notions élémentaires d'Astronomie touchant l'équation du temps.

L'heure vraie est mesurée en un point quelconque du globe par l'angle horaire du Soleil vrai : l'heure moyenne par l'angle horaire du Soleil moyen. La différence entre ces deux heures est donc égale à la différence entre l'ascension droite du Soleil vrai et celle du Soleil moyen : cette différence est nulle quatre fois par an : le 15 avril, le 14 juin, le 31 août et le 24 décembre. La plus grande valeur pour chaque période est de 14^m32^s le 11 février, 3^m52^s le 14 mai 6^m12^s le 26 juillet et 16^m19^s le 2 novembre : cette différence s'appelle l'*équation du temps*. Les Tables du Soleil la donnent pour Paris dans la colonne intitulée *Temps moyen à midi vrai*. On voit à première vue que le midi moyen précède le midi vrai de décembre en avril et de juin en août, ce qui correspond donc à un retard de l'heure vraie : il y a au contraire avance d'avril en juin et d'août en décembre.

Pour convertir le temps moyen en temps vrai, il suffit de connaître le temps moyen à midi vrai à Paris et la longitude du lieu où l'on se trouve : soit, par exemple, qu'on se propose de calculer l'heure vraie correspondante à 10^h du matin à Lille,

le 2 mars 1882. On trouve dans les Tables de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* :

Longitude de Lille....................	0° 43′ 37″ E.
Équation du temps....................	$0^h\,12^m19^s$

La longitude convertie en temps (¹) donne $0^h\,2^m55^s$; comme elle est orientale, il faut la retrancher pour avoir l'heure moyenne de Paris, qui est $9^h\,57^m\,5^s$; retranchant encore l'équation du temps pour midi, nous aurons une valeur approchée de l'heure vraie. C'est $9^h\,44^m\,46^s$.

Mais il faut tenir compte de ce qu'il n'est guère que 10^h : il y a donc à calculer la différence x produite de ce chef. On peut la déduire de la différence tabulaire correspondant au jour de l'opération, par simple règle de trois, car on a

$$\frac{x}{10} = \frac{12}{24};$$

d'où

$$x = 5^s,$$

qu'on doit retrancher. L'heure vraie de Paris est donc $9^h\,44^m43^s$ et celle de Lille $9^h\,47^m\,38^s$. La différence avec l'heure moyenne est assez grande pour qu'on ne puisse la négliger.

Manuel opératoire.

I. *Mesure de l'angle réfringent* A :

1° L'opérateur dispose la source lumineuse à quelques centimètres au devant du collimateur : puis, la fente étant bien nettoyée au blaireau et entr'ouverte de 1^{mm} au plus, il dirige la lunette et règle son tirage, de manière à apercevoir nettement la mire lumineuse et, dans son milieu, le fil vertical du réticule.

Pour achever de règler le goniomètre, il met l'alidade de la plate-forme centrale au zéro de la graduation du cercle, et la fixe dans cette position.

(¹) On sait que le degré géométrique équivaut à quatre minutes de temps, et une minute de degré à quatre secondes de temps.

2° Le prisme doit être placé sur la plate-forme de telle sorte e l'arête commune aux deux faces qui limitent l'angle èdre soit normale au plan du limbe et parallèle à l'axe de tation de la lunette. On commence par fixer le prisme avec ı peu de cire, en veillant à ce que l'arête et son image réflé- ıie sur la surface de la plate-forme soient dans le prolonge- ent l'une de l'autre : puis, on cherche tour à tour l'image de fente sur les deux plans du dièdre, en faisant tourner la ate-forme indépendamment de son alidade. Les images don- ées par réflexion doivent coïncider toutes deux avec le fil ver- cal du réticule; généralement ce résultat n'est pas obtenu du emier coup, et l'on se voit obligé, en pressant le prisme sur la re, de modifier sa position initiale. Cette opération est assez ngue, attendu qu'on ne peut toucher à l'une des faces sans ėranger l'autre.

La lunette est fixée dans la position qu'elle occupait dans ette recherche : l'image de la mire réfléchie sur une des faces ı prisme coïncide donc avec le repère du réticule, et l'ali- ıde de la plate-forme est au zéro.

3° On desserre cette alidade et on la fait mouvoir jusqu'à que, la réflexion ayant lieu sur l'autre face du même angle, mage de la mire coïncide de nouveau avec le même re- ère.

Le nombre de degrés parcourus par l'alidade est le supplé- ent de l'angle de réfringence cherché.

II. *Mesure de la déviation minimum :*

1° Le réglage du prisme, décrit ci-dessus, étant vérifié, on ce la lunette au zéro et l'on fait tourner le collimateur jusqu'à que le fil vertical apparaisse au milieu de la fente verticale luminée.

2° Le prisme est alors mis en place, avec les précautions ue nous avons déjà signalées : puis, on cherche le spectre n faisant tourner la lunette vers la base du prisme. L'ayant ouvé, on constate généralement qu'il se déplace à droite et gauche par deux mouvements contraires du support : ce n'est onc pas le spectre de la déviation minimum; mais on dé- ouvre rapidement une position du prisme telle que deux ro- tions contraires dévient le spectre dans le même sens. On isit le moment où la raie dont on cherche l'indice paraît sta-

tionnaire, on l'amène en coïncidence avec le repère de l'oculaire et l'on note l'angle indiqué par le vernier.

C'est l'angle δ cherché.

Quand on opère sur des liquides, il est nécessaire de soumettre à une épreuve préliminaire le prisme qui sert de récipient à la substance, car le défaut inévitable de parallélisme des lames de verre à travers lesquelles chemine le rayon réfracté produit une déviation qui n'est pas le fait du liquide réfringent : les meilleurs prismes ont une déviation propre de 30″ et elle dépasse souvent 1′. On détermine donc avant tout cette déviation et on l'ajoute ou bien on la retranche de celle qu'on observe dans l'opération définitive.

On peut prédire que le terme correctif sera d'autant plus grand que l'angle du prisme est plus petit : aussi emploie-t-on de préférence des prismes de 60°.

La mesure de l'angle de réfringence d'un prisme creux n'est point facile, par suite de la double réflexion produite sur ses faces intérieure et extérieure; M. Macé de Lépinay a conseillé de le remplir d'une dissolution concentrée d'acide phénique, dont l'indice de réfraction est très voisin de celui du verre; dans ces conditions, la détermination de A ne souffre plus de difficultés.

Résultats.

Les indices de réfraction mesurés dans l'air doivent être multipliés par 1,00029 pour être rapportés au vide.

Indices de réfraction des verres pour quelques raies du spectre

(Abbé Dutirou).

	Densité.	B.	C.	D.	E.	F.	G.
Flint Guinand.......	3,610	1,691	1,692	1,697	1,702	1,708	1,717
Crown (id.).........	2,184	1,612	1,613	1,615	1,618	1,621	1,626
Crown (Dollond)....	2,484	1,608	1,609	1,611	1,615	1,617	1,623
Verre de St-Gobain...	2,329	1,587	1,588	1,590	1,593	1,596	1,601

Indice des corps solides

(*Annuaire du Bureau des Longitudes*).

	Indice.	Radiation.
Diamant	2,414	Rouge
Quartz { ordinaire	1,544	Raie D
Quartz { extraordinaire	1,553	» D
Sel gemme	1,543	» D
Spath { ordinaire	1,658	» D
Spath { extraordinaire	1,486	» D
Sylvine	1,482	» D
Verre de thallium	1,690	» D
Sucre candi	1,535	Rouge
Baume du Canada	1,532	»

Indice des liquides.

Alcool absolu à 15° C	1,363
Benzine	1,413
Chloroforme à 10° C	1,449
Glycérine à 30° C	1,468
Huile d'amandes à 22° C	1,471
Sulfure de carbone à 10° C	1,635
Essence de girofle	1,537
Eau distillée à 10° C	1,333

ne sera pas sans intérêt d'adjoindre à ces Tableaux les es cristallographiques d'un certain nombre de substances érales : leur mesure est un excellent exercice de goniorie.

	° ′	° ′
Spath d'Islande	105. 5	74.55
Quartz hyalin	94.15	85.45
Carbonate de baryte	118.30	61.30
Sulfate de baryte	101.42	78.19

LXXIe MANIPULATION.

ANALYSE SPECTRALE.

Théorie.

Les substances qui existent à l'état de vapeurs incandescentes dans une flamme déterminent dans son spectre des raies brillantes sur l'observation desquelles MM. Kirchhoff et Bunsen ont fondé une méthode d'analyse qualitative d'une sensibilité extrême : la présence de $\frac{1}{3000000}$ de milligramme de chlorure de sodium peut être décelée par ce procédé.

On l'applique avantageusement à la recherche des métaux alcalins et terreux; les autres métaux donnent des raies tellement nombreuses qu'il faut renoncer à les distinguer entre elles.

Les raies sont d'autant plus visibles, que la température de la flamme est plus élevée et son pouvoir éclairant moindre; pour un même métal, c'est la combinaison la plus volatile qui donne les raies les plus intenses.

Les conditions les plus favorables de l'expérience ressortent de ce qui précède.

En multipliant le nombre des prismes et le grossissement de l'appareil optique, on découvre encore des raies qui avaient échappé à une première observation : toutefois MM. Kirchhoff et Bunsen ont reconnu qu'il y avait avantage à rester dans les limites d'un examen rapide et facile, et ils ont opéré dans la flamme d'un brûleur Bunsen sur des chlorures dont ils formaient le spectre à l'aide d'un seul prisme, en l'observant avec une lunette grossissant au plus huit fois. Telles sont les conditions normales de l'analyse spectrale (1).

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, LXII, p. 452; LXIV, p. 257; 4e série, t. I, p. 396; *Instruction pratique sur l'analyse spectrale*, par M. Grandeau, 1863.

Il importe de faire remarquer dès le début de cette étude ue les spectres obtenus de la sorte avec des instruments diférents ne sont point directement comparables : l'indice de éfraction, le pouvoir dispersif du prisme, son angle réfrin;ent et la valeur des divisions du micromètre ne sont jamais dentiques et les positions relatives des raies varient dans de arges limites. Il faut nécessairement recourir aux longueurs l'onde pour définir les repères auxquels on rapporte toutes es expériences. La suite de cette manipulation démontrera 'importance de cette remarque.

Description.

Il me paraît inutile de décrire le spectroscope, auquel tous les Traités de Physique consacrent un chapitre spécial ; mais l'attention du lecteur sera appelée utilement sur quelques points qui sont de la plus haute importance.

Le constructeur livre l'instrument réglé au minimum de déviation du jaune : le collimateur est fixe et le prisme est repéré de telle sorte qu'on ne puisse modifier l'agencement de l'appareil réfringent. Le prisme est généralement équilatéral en flint : on le recouvre d'un tambour à trois trous pour empêcher l'accès de la lumière diffuse.

La fente du collimateur est élargissable à volonté par une vis de pression : cette vis doit pouvoir être desserrée suffisamment pour permettre le nettoyage des lames parallèles qui forment la fente ; de plus, il faut que le parallélisme de ces lames puisse être rétabli, s'il avait été détruit par accident. Un petit prisme de verre qui recouvre la moitié supérieure de la fente permet d'étudier à la fois le spectre de deux sources et de les comparer.

En face du collimateur se trouve adaptée, sur un bras mobile, la lunette par laquelle on observe le spectre : une vis de pression dont le bras est muni permet d'élever ou d'abaisser la lunette dans le plan vertical ; le tirage se règle à la façon ordinaire.

Un troisième tube, mobile comme le précédent, contient l'appareil optique destiné à projeter sur le prisme l'image d'un micromètre. Ce tube porte deux vis de réglage ; l'une par laquelle on déplace l'image dans le plan vertical, l'autre qui

permet de la porter à droite ou à gauche, de manière à faire coïncider le point 100 de la division micrométrique avec telle ou telle raie spectrale. Enfin une vis spéciale sert à la mise au foyer. On illumine l'échelle avec une bougie ou une petite lampe à éponge imbibée d'essence de pétrole.

Il est nécessaire d'essuyer de temps en temps tous les verres du spectroscope avec une peau de chamois et de passer un pinceau de blaireau sur la fente pour en enlever les poussières qui feraient naître dans le spectre des raies transversales fort gênantes pour l'observation. On ne doit pas négliger de couvrir la fente d'un chapeau de laiton chaque fois qu'on se sera servi de l'instrument.

La lampe de Bunsen est d'un usage extrêmement commode: on la surmonte d'un cône pour empêcher le vacillement de la flamme. Je ne saurais assez recommander d'entretenir la lampe dans un grand état de propreté.

On peut dissoudre les chlorures volatils dans de l'alcool et former avec ces liquides de petites lampes qui sont fort utiles pour exercer les commençants à l'observation des raies; mais, dans l'usage courant, on emploie des fils de platine tournés en boucle et soudés à un tube de verre, que l'on plonge dans une dissolution aqueuse du sel à essayer; on pourrait aussi brûler une allumette plongée dans la dissolution d'essai. On opère sur le bord de la flamme du brûleur; c'est la partie la plus chaude : M. Bunsen estime sa température à 2340°.

Cette température est insuffisante pour maintenir à l'état de vapeur certaines substances métalliques peu volatiles : on met alors à profit la chaleur dégagée par l'étincelle de la bobine d'induction. Souvent il suffit de faire jaillir cette étincelle entre deux pôles constitués par ces métaux : les parcelles arrachées sont volatilisées et donnent une traînée lumineuse qui paraît continue et donne de très beaux spectres. M. Lecoq de Boisbaudran recommande de ne point faire usage du condensateur, parce qu'il altère profondément les spectres : il conseille encore d'employer une bobine fournissant des décharges d'au plus 50^{mm} de longueur; la pile peut être composée de cinq couples de 17^{cc} au bichromate (1).

(1) Lecoq de Boisbaudran, *Spectres lumineux*, 1874.

MM. Delachanal et Mermet ont imaginé un petit appareil qui permet d'exciter l'étincelle à la surface d'une dissolution saline. C'est un tube à essai dont le fond est traversé par un fil de platine A (*fig.* 115), servant d'électrode négative; un petit tube capillaire D légèrement conique coiffe ce fil et le laisse dépasser de 1^{mm}. La liqueur à examiner remplit le fond de l'éprouvette et s'élève par capillarité jusqu'au sommet du tube D. L'étincelle jaillit en B, le fil CB étant relié au pôle positif.

Fig. 115.

L'électricité est d'un emploi fort avantageux, car elle donne un spectre brillant d'une observation facile : mais elle présente le grand inconvénient de ne pas fournir de résultats comparables à ceux qu'on obtient avec le brûleur à gaz dont la température est beaucoup moins élevée. Le nombre des raies est considérablement augmenté, et leur observation est plus délicate. Aussi, dans la pratique, ce mode d'observation a-t-il été réservé pour les métaux peu volatils et l'on continue de se servir du simple brûleur quand on recherche les métaux alcalins et terreux.

Autant que possible, le spectroscope et ses accessoires doivent être installés dans une pièce spécialement affectée aux analyses spectrales : on choisira de préférence un cabinet exposé au midi, afin de pouvoir y faire pénétrer un rayon de soleil. Nous conseillons l'emploi d'une table de $1^m,40$ de hauteur permettant de travailler debout : on lui donnera la surface nécessaire pour recevoir tous les appareils nécessaires à l'analyse ainsi qu'une bobine de Ruhmkorff.

Réglage du spectroscope. — Le prisme étant enlevé, on dispose d'abord le collimateur et la lunette dans le prolongement l'un de l'autre, de telle sorte que l'image de la fente se trouve à peu près au milieu du champ de la lunette, ce qui s'obtient en agissant sur la vis du bras de cette lunette : en même temps le fil de l'oculaire est rendu parallèle à l'image de la fente; puis on met le prisme en place et l'on cherche le spectre d'une bougie, en orientant convenablement la lunette.

Enfin, on règle le micromètre : son image parfaitement nette doit se placer au-dessus de la bande lumineuse du spectre et parallèlement à sa direction, le zéro à gauche.

Ces conditions préliminaires remplies, on vérifie le parallélisme des bords de la fente et on lui donne la largeur voulue pour l'expérience que l'on se propose d'entreprendre : on ne peut formuler à cet égard de prescription absolue, parce qu'il faut une ouverture beaucoup plus large pour l'étude des parties extrêmes.

Pour l'observation du spectre moyen, il convient que la fente, vue par la lunette, paraisse large de 6 à 8 dixièmes de millimètre au plus; mais cette largeur doit être réduite de moitié quand on examine les spectres de l'étincelle électrique. On peut du reste faire varier la largeur dans le cours d'une expérience.

Pour dédoubler la raie D, il faut une fente très étroite.

Manuel opératoire.

1° L'observateur met le micromètre et l'oculaire au point : c'est un réglage personnel.

2° Il dispose le brûleur Bunsen devant la fente du collimateur. Pour éviter le spectre spécial de cette flamme, on en observe les bords en dirigeant l'axe du collimateur tangentiellement au cône lumineux. Il ne faut pas introduire aussitôt dans la flamme les substances à étudier, mais on les en approche pour les y pousser au moment où l'attention est déjà fixée sur le champ spectral. On emploie commodément un support à potence pour porter les fils de platine : on peut aussi les tenir à la main.

3° L'opérateur observe la raie D du sodium et la fait coïncider avec la 100e division du micromètre divisé en 250 parties.

4° Il introduit dans la flamme le fil de platine qu'il se propose d'employer pour constater qu'il ne produit aucune raie. Il le trempe alors dans la solution à analyser et le porte dans la flamme.

D'un premier coup d'œil, on voit dans quelle région naissent les raies : dans une série d'expériences subséquentes, on

fixera spécialement son attention sur les diverses régions qui présentent de l'intérêt.

5° Il ne reste qu'à inscrire sur une échelle dessinée sur papier, dont les divisions correspondent à celles du micromètre, la position des raies observées et à les comparer à un tableau type. Les constructeurs fournissent des échelles gravées, préparées pour cet usage.

Dans les cas incertains, on recourt à la comparaison des spectres par l'emploi du petit prisme de verre dont on recouvre alors la partie supérieure de la fente : la flamme qui donne le spectre type est disposée sur le côté du collimateur, l'autre étant en face de la fente.

Nous trouvons dans l'Ouvrage de M. Lecoq de Boisbaudran une remarque très importante, relativement à la direction du regard dans l'observation du spectre : les raies, surtout celles des extrémités, subissent, lorsqu'elles n'occupent pas le milieu du champ, un changement de position très sensible lorsque l'œil se déplace. On y obvie en approchant l'œil le plus près possible de l'oculaire et en dirigeant le regard de façon à voir, à droite de la raie à observer, autant de divisions micrométriques qu'à gauche.

Il existe une autre cause d'erreur que nous devons signaler aux physiciens : quand la fente est un peu large et que la source lumineuse est de faible diamètre et très voisine de la fente, on déplace les raies en déplaçant la flamme ; c'est un effet de parallaxe dont il faut être prévenu.

On doit donc se garder de toucher à la source lumineuse après réglage du micromètre.

Constatons enfin que, par un effet d'irradiation, le fil de l'oculaire est peu visible quand il se projette sur des raies très vives; dans le bleu et le violet, on éprouve aussi quelque difficulté à le voir, quelle que soit l'intensité de la lumière. C'est un inconvénient qu'il est impossible de supprimer, mais dont on peut s'affranchir par une longue expérience et une attention minutieuse.

Résultats.

Les métaux que l'analyse spectrale peut déceler facilement sont les suivants : le sodium, le potassium, le rubidium, le

cœsium, le lithium, le strontium, le baryum, le calcium, le thallium et l'indium; le magnésium, l'erbium, le chrome, le manganèse, le cuivre, le zinc et l'argent peuvent être distingués dans l'étincelle électrique, mais avec de grandes difficultés.

Le sodium donne une raie jaune qu'on peut dédoubler; on la place toujours au point 100 du micromètre.

Le potassium fait naître dans la flamme du gaz deux raies principales, l'une rouge, l'autre violette.

Le rubidium y produit deux raies rouges et deux raies violettes; le cœsium, deux raies bleues; le lithium, une raie orangée et une raie jaune très faible; le strontium, quatre raies rouges, une jaune et une bleue; le baryum, une dizaine de raies et de bandes entre le rouge et le bleu; le calcium, des bandes orangées et jaunes et une raie verte; le thallium, une seule raie verte très brillante; enfin l'indium, une raie bleue et une raie violette.

Pour une observation très nette, il suffit des quantités suivantes des divers métaux (Grandeau) :

	mgr
Sodium	0,0000003
Lithium	0,0000009
Calcium	0,00001
Cœsium	0,00005
Strontium	0,00006
Thallium	0,00002
Rubidium	0,0002
Potassium	0,001
Baryum	0,001

La sensibilité du procédé analytique est donc inégale.

Les indications spécifiques qui précèdent sont assurément fort utiles, mais elles ne sont pas assez précises, car elles n'indiquent la position des raies que par leur couleur; il faut nécessairement mettre à la disposition de l'opérateur une Carte spectrale qui lui permette de reconnaître et de distinguer avec une certitude absolue, les raies caractéristiques des divers métaux. Or, nous l'avons déjà dit, par suite de la dispersion variable des prismes, le micromètre ne donne pas de re-

es assez exacts pour que les observations faites avec des ruments différents soient comparables. Il faut donc recourir à un autre mode de classement : le meilleur est celui est basé sur les longueurs d'onde.

ıdiqué par Ångström, il a été appliqué par M. Thalén [1] ılus tard par MM. Mascart et Lecoq de Boisbaudran.

'ai dressé le Tableau suivant sur les données empruntées Mémoires publiés par ces savants physiciens.

ıgueurs d'onde des raies des métaux alcalins et terreux ·n millionièmes de millimètre (dans la flamme du gaz).

Métaux.	Couleur de la raie.	Intensité.	Remarques.	Longueur d'onde.
ium.....	Jaune α.	Très forte.	A dédoubler.	589,2
ıssium...	Rouge α.	Forte.	Milieu d'un groupe.	768,0
	Violette γ.	Large.		404,5
idium...	Rouge δ.	Assez forte.		780,0
	Orangée γ.	Assez forte.		629,7
	Violette β.	Forte.	Caractéristique.	421,6
	Violette α.	Très forte.		420,2
ium.....	Bleue β.	Forte.		459,7
	Bleue α.	Très forte.	Presque indigo.	456,0
ium.....	Rouge α.	Très forte.	Persistante.	670,6
	Jaune	Assez forte.		610,2
ıntium...	Rouge ζ.	Assez forte.	Bande.	682,7
	Rouge γ.	Forte.	Bande.	669,4
	Rouge ε.	Assez forte.	Bande.	659,7
	Rouge δ.	Forte.	Bande.	646,4
	Jaune α.	Très forte.	Bande large.	606-603
	Bleue δ.	Forte.	Persistante.	460,7
yum.....	Orangée γ.	Forte.	Fondue.	604,4
	Orangée β.	Forte.		588,1
	Jaune η.	Assez forte.	Large.	566,1
	Jaune α.	Forte.		553,6
	Jaune δ.	Forte.	Voisine de α.	549,2
	Verte ε.	Assez forte.	Fondue.	534,6
	Verte θ.	Assez forte.		521,5
	Bleue κ.	Assez forte.	Bande fondue.	487,3

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, XVIII, p. 202.

Métaux	Couleur de la raie.	Intensité.	Remarques.	Longueur d'onde.
Calcium.....	Orangée α.	Très forte.	Double.	620,2
	Orangée α.	Très forte.		618,1
	Jaune β.	Forte.	Bande.	554,3
	Indigo.	Faible.	Tout à fait isolée.	422,3
Thallium....	Verte α.	Très forte.	Caractéristique.	534,9
Indium.....	Bleue α.	Très forte.	Brillante.	451,1
	Violette β.	Forte.		410,1

Longueurs d'onde des principales raies de quelques métaux en millionièmes de millimètre (étincelle).

Métaux.	Couleur de la raie.	Intensité.	Remarques.	Longueur d'onde.
Magnésium ($MgCl$).	Verte α.	Très forte.		518,3
	Verte α.	Très forte.	A dédoubler.	516,7
Erbium (ErO).	Verte β.	Forte.		538,8
	Verte α.	Forte.	Voisines.	522,8
	Verte α.	Assez forte.		520,4
Chrome (Cr^2Cl^6).	Verte α.	Très forte.		520,5
	Indigo β.	Forte.		429,0
	Indigo β.	Forte.		427,5
	Indigo β.	Assez forte.		425,5
Manganèse ($MnCl^2$).	Orangée β.	Forte.	A dédoubler.	601,8
	Bleue α.	Forte.		482,5
	Bleue α.	Forte.	Voisines.	478,4
	Bleue α.	Forte.		475,5
Cuivre ($CuCl$).	Rouge ε.	Assez forte.	Bande.	616,8
	Rouge ζ.	Assez forte.	Bande.	606,1
	Jaune γ.	Forte.		578,1
	Verte $α_1$.	Très forte.		521,8
	Verte β.	Forte.		515,3
	Verte $α_2$.	Très forte.		510,6
Zinc ($ZnCl^2$).	Orangée β.	Forte.		636,1
	Bleue α.	Très forte.		481,2
	Bleue γ.	Forte.		472,1
	Bleue δ.	Forte.		468,1
Argent (AgO, AzO^5).	Verte α.	Très forte.	Très brillante.	546,4
	Verte β.	Très forte.	Très brillante.	520,8

L'usage de ces Tables n'est possible qu'à la condition d'avoir établi d'abord une concordance entre les divisions microm-

›s du spectroscope dont on se sert et les longueurs e des radiations. Cette graduation préalable ne présente, vrai, aucune difficulté ; en effet, il suffit de savoir à ›s longueurs d'onde correspondent quelques points du ›mètre pour posséder les éléments d'une courbe ou d'une : de réduction. Voici, par exemple, sur quelles bases ›coq de Boisbaudran a établi la valeur des divisions de nstrument; dans le Tableau ci-dessous, les repères qu'il ›isis sont donnés en fonction du micromètre et des lonrs d'onde :

Raies.	Division du micromètre.	Longueur d'onde.	Auteurs.
Potassium α...	65,55	768,0	Mascart.
Soleil *a*......	72,50	718,5	Ångström.
Soleil B......	77,81	686,7	Id.
Lithium α....	80,78	670,6	Mascart.
Sodium α....	100,00	589,2	Fraunhofer.
Cuivre γ.....	103,25	578,1	Thalén.
Argent α.....	114, 0	546,4	Mascart.
Thallium α...	118,40	534,9	Thalén.
Calcium......	188,25	422,6	Mascart.
Indium α....	200,83	410,1	Thalén.

s raies solaires peuvent aussi être employées à la gra-on; nous croyons utile d'inscrire ici leurs longueurs le d'après Ångström :

Raies.	Longueurs d'onde.	Raies.	Longueurs d'onde.
A..........	760,09	b_2..........	517,20
a..........	718,50	b_3..........	516,83
B..........	686,68	b_4..........	516,67
C..........	656,18	F..........	486,06
D_2.........	589,50	G..........	430,72
D_1.........	588,90	*h*..........	410,12
E..........	526,90	H_1.........	396,80
b_1..........	518,30	H_2.........	393,28

s éléments suffisent pour calculer, par interpolation, la ıeur d'onde d'une radiation correspondant à n'importe e division micrométrique; on dresse alors une Table de ersion, qui pourra être établie sur le modèle suivant, ›unté encore à M. Lecoq de Boisbaudran :

M.	λ.	δ.
62	796,75	8,60
63	788,37	8,40
64	780,21	8,15
..	......	....

Elle exprime les divisions M du micromètre en longueurs d'onde λ : pour l'usage, il est commode d'en dresser une autre convertissant les longueurs d'onde en divisions du micromètre; telle est la Table ci-dessous :

λ.	M.	δ.
797	61,97	0,12
796	62,09	0,12
795	62,21	0,12
...	.....	....

Mais il est bien plus avantageux de construire une courbe à grande échelle, en portant en abscisse les divisions M du micromètre et en ordonnée les longueurs d'onde λ; il suffit de douze points de repère pour tracer avec une grande exactitude l ligne courbe qui représente la fonction; on a dès lors un Ta bleau à double entrée, sur lequel on peut marquer les raie des principaux métaux et leur couleur. J'ai reproduit (*fig.* 11 un tracé graphique, exécuté sur une planche carrée de 400mm de côté, qui permet de lire les longueurs d'onde au qua de millionième de millimètre; le format de ce Livre a obli d'en réduire considérablement les proportions, mais le le teur en reconnaîtra les dispositions générales, que je crains pas de lui proposer pour modèle. Les limites des co leurs ont été fixées par la règle de M. Listing, de la mani suivante :

Rouge extrême	723,4
Limite du rouge et de l'orangé	647,2
» de l'orangé et du jaune	585,6
» du jaune et du vert	534,7
» du vert et du bleu	491,9
» du bleu et de l'indigo	455,5
» de l'indigo et du violet	424,1
» du violet extrême	396,7


Rouge
Orange
Jaune
Vert
Bleu
Indigo
Violet
Sr Li Sr Sr Ca Sr Na Ca Ag T Ba Ba Cs Cs I R R
60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200
770 750 730 710 690 670 650 630 610 590 570 550 530 510 490 470 450 430 410

Fig. 116.

LXXIIe MANIPULATION.

ÉTUDE DES SPECTRES D'ABSORPTION PAR PROJECTION.

Théorie.

Les milieux colorés exercent sur la lumière une absorption élective, liée à leur nature propre et à leur état moléculaire, qui constitue pour eux des caractères spécifiques comparables à ceux que nous avons étudiés dans les spectres d'émission.

C'est par l'étude des spectres transmis à travers la substance que le physicien analyse l'action plus ou moins complexe qu'elle produit sur la radiation lumineuse ; il note la position relative, le nombre, la largeur et l'intensité des bandes obscures qui sillonnent le spectre continu produit par une lumière blanche.

Il ne faut pas se dissimuler que ces bandes d'absorption fournissent un critérium moins sûr que les raies brillantes, produites par les métaux réduits à l'état de vapeurs incandescentes ; en effet, ainsi que l'intensité de la source, la concentration des liqueurs modifie la largeur et même le nombre des bandes, et l'aspect du spectre change complètement avec l'épaisseur du liquide ; de plus, une fente large fait disparaître des franges qui sont très nettes avec une fente plus étroite. Ajoutons encore que les travaux auxquels nous emprunterons les résultats les plus saillants ont le tort général d'être rapportés à des divisions micrométriques et non point aux longueurs d'onde. Malgré ces défauts de la méthode, l'observation des spectres d'absorption a conduit à de brillantes découvertes, que nous ne devions point passer sous silence.

Les dispositions expérimentales indiquées ci-dessus pourraient être appliquées dans cette manipulation ; mais nous avons cru plus utile de recourir aux projections, pour initier les élèves à ces procédés si précieux pour l'enseignement.

Description.

ources lumineuses employées sont : l'arc voltaïque ou
ɔe de Drummond; cette dernière a l'inconvénient
ın peu faible, mais elle présente, par contre, l'avan-

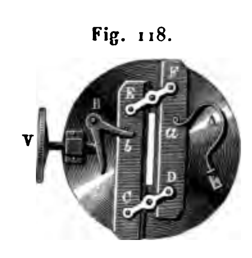
Fig. 117.



ιre très facilement maniable, et nous n'hésiterons pas
ommander dans les laboratoires, où l'on n'est pas
e projeter à de grandes distances. La dépense par
est guère que de 60^{lit} d'oxygène, dont le prix de
peut être évalué à 1^{fr}; quant à la dépense en gaz

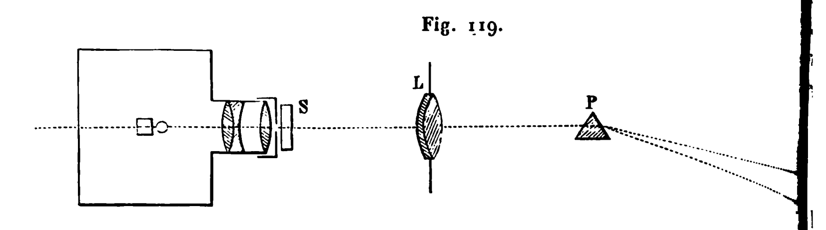
d'éclairage, elle ne dépasse pas $0^{fr},05$ (1). L'oxygène se conserve sous pression dans un sac de caoutchouc sur lequel on exerce, à l'aide d'une planche mobile à charnières, un effort de 50^{kg} à 60^{kg}; ce gaz est amené par le robinet B (*fig.* 117) au centre du jet de gaz combustible qui arrive par le robinet A. Le cylindre de chaux est frappé obliquement par le dard de flamme. Le réglage se fait par une crémaillère, qui permet d'élever ou d'abaisser le centre du foyer, et par une vis, qui change l'obliquité du chalumeau.

Fig. 118.



La lampe Drummond occupe le centre d'une lanterne dont la partie antérieure est fermée par un jeu de lentilles, qui permet de rendre parallèles les rayons émergents; une fente mince limite le faisceau (*fig.* 118). En avant de cette fente, on dispose, à 300^{mm} tout au plus, une lentille achromatique L de 350^{mm} environ de longueur focale (*fig.* 119); le prisme P se place à 300^{mm} en avant, dans la position de la déviation minimum; enfin l'écran se trouve en E. Le milieu absorbant, renfermé dans une cuve faite de lames

Fig. 119.

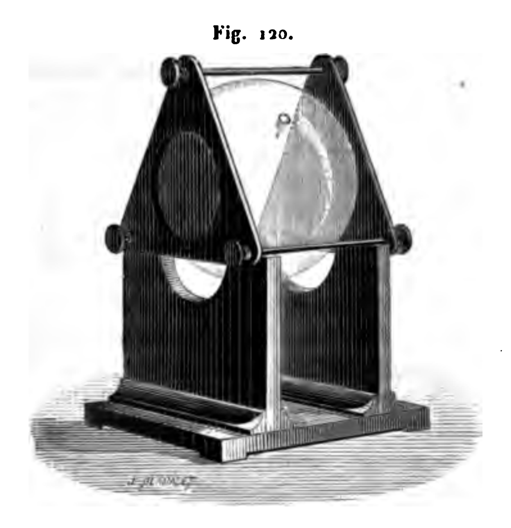


de verre, collées à la gomme laque, ou dans des flacons plats à faces taillées, peut être interposé n'importe où sur le chemin des rayons, mais il y a de sérieux avantages à le mettre contre la fente, sur un support S.

(1) L'éclairage électrique produit par la pile, à l'aide d'un régulateur Duboscq, revient au moins à 10^{fr} par heure tous frais compris.

Quand on veut opérer sur des vapeurs ou des gaz, on emploie des tubes spéciaux ou des sphères limitées par deux lans parallèles (*fig.* 120); une double tubulure permet d'y

Fig. 120.



introduire les gaz voulus; quant aux vapeurs, on les forme dans le récipient même, en chauffant une parcelle ou quelques gouttes de la substance, à l'aide d'une lampe à alcool promenée sous le ballon.

Manuel opératoire.

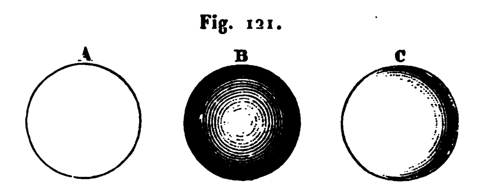
L'expérimentateur allume le gaz avant de donner l'oxygène; les robinets doivent être réglés de telle sorte que la lampe brûle sans bruit.

Il est bon de faire tourner le bâton de chaux plusieurs fois sur son support, pour l'échauffer également et l'empêcher de se briser. Dans le cours de l'opération, on le retournera encore sur lui-même tous les quarts d'heure, de manière à présenter à la flamme une surface neuve; sinon, le crayon se creuserait et rejetterait la flamme en avant, au risque de fendre les lentilles de verre de la lanterne de projection.

2° On procède ensuite au centrage du point lumineux;

pour cela, on projette d'abord l'ouverture de la lanterne sur l'écran. Si le centrage est bon, le disque est uniformément éclairé, comme on le voit en A (*fig.* 121) ; si le point lumineux, tout en étant dans l'axe des lentilles, en est trop rapproché, le disque présente, comme en B, une pénombre bleuâtre; elle serait orangée si le point était trop éloigné

Fig. 121.



des lentilles. L'apparence du disque C est produite lorsque le point lumineux est hors de l'axe ; on corrige cette excentricité, en déplaçant ou en élevant la source de lumière. Ces remarques sont très importantes.

3° On adapte à la lanterne le bouchon à fente ; après lui avoir donné une direction verticale, on limite sa largeur à 1^mm^ environ.

4° Pour trouver la position convenable de la lentille, on cherche à former sur l'écran une image nette de la fente : c'est alors seulement que le prisme est disposé sur le chemin des rayons. Cette opération est facilitée par l'usage d'un petit écran à main, par lequel on suit la marche du faisceau. Le prisme doit être mis à la déviation minimum ; pour s'en assurer, on le fait tourner autour de son axe vertical, toujours dans le même sens, jusqu'à ce que l'image spectrale devienne stationnaire et retourne en sens inverse.

5° Le milieu absorbant est enfin disposé contre la fente; en plaçant tour à tour la cuve à plat ou de champ, on fait varier fort simplement l'épaisseur de la substance et l'on obtient le même effet que si l'on concentrait la liqueur.

Résultats.

Les substances minérales possèdent des spectres d'absorption qui sont généralement mal définis, et partant peu inté-

ressants; exceptons-en toutefois le permanganate de potasse, les sels de didyme, le chlorure d'erbium, l'alun de chrome et l'azotate d'urane.

Une solution étendue de $0^{gr},1$ par litre de permanganate de potasse, observée sous une épaisseur de 10^{mm}, donne sept bandes dans le vert et le bleu; les quatre bandes vertes se confondent quand on augmente l'épaisseur ou la concentration, tandis que les bandes bleues prennent une plus grande intensité.

Les solutions de chlorure de didyme offrent une teinte jaunâtre, lorsqu'elles sont concentrées, et rose violette lorsqu'elles sont très diluées. On peut faire usage d'une liqueur assez chargée de substance pour paraître jaunâtre sous une épaisseur de 15^{mm}: dans ces conditions, le spectre est sillonné de raies et de bandes, parmi lesquelles nous signalerons une bande large dans le jaune ($\lambda = 580$) et une autre plus étroite dans le vert ($\lambda = 520$); trois raies sont nettement visibles dans le bleu.

Le chlorure d'erbium montre dans le spectre quatre raies bien définies, dans le rouge, le jaune, le vert et le bleu; il ne faut pas trop élargir la fente pour cette observation.

L'alun de chrome donne une large bande dans le vert et une raie dans l'orangé.

Enfin l'azotate d'urane produit des raies distinctes dans le bleu ([1]).

Mais les réactions spectrales des matières organiques sont beaucoup plus remarquables; non seulement ces substances fournissent des spectres d'absorption caractéristiques, mais encore elles présentent des modifications curieuses sous l'action de réactifs spéciaux, qui permettent de les reconnaître avec une certitude absolue. Nous ne nous occuperons que des spectres du sang et de la chlorophylle.

Le sang doit sa coloration à une matière protéique, appelée *hémoglobine,* dont le spectre d'absorption est caractérisé par deux larges bandes, situées l'une dans le jaune, l'autre dans le vert; $\frac{1}{10000}$ d'hémoglobine donne un effet sensible. Il suffit, pour observer ce spectre, d'introduire deux gouttes de

---

([1]) Cf. LECOQ DE BOISBAUDRAN, *loc. cit.*

sang dans 5cc d'eau : les globules se détruisent par l'action de l'eau, et leur matière colorante, c'est-à-dire l'hémoglobine, se dissout.

Les bandes de l'hémoglobine sont d'une netteté remarquable ; la première bande, étroite et foncée, confine à la raie du sodium par son bord le moins réfrangible ; la seconde, moins noire et mieux fondue, se termine à la raie E. Ces caractères sont assez faciles à distinguer, et aucune confusion n'est possible avec le suc de cerises, les infusions de bois du Brésil ou de garance, le vin rouge, les couleurs d'aniline, le carmin de cochenille ou le picrocarminate d'ammoniaque. Le sang possède, du reste, deux réactifs spectraux qui ne laissent subsister aucun doute ; les agents réducteurs, comme l'hydrogène sulfuré, le sulfhydrate d'ammoniaque, le tartrate d'étain, le sulfate de protoxyde de fer, font disparaître les deux bandes et les remplacent par une bande unique, placée dans l'intervalle des précédentes ; cet effet n'est que passager. Les alcalis et les acides, qui transforment l'hémoglobine en hématosine et en hémine, modifient son spectre ; un peu d'alcool ammoniacal donne une bande diffuse dont le milieu est en D ; l'acide tartrique ou acétique produit une bande dans le rouge vers la raie C.

Ces caractères sont tellement faciles à observer, que la recherche des taches de sang est devenue une opération très simple [1].

Les spectres de la chlorophylle, si bien étudiés par M. Chautard [2], ne présentent pas moins d'intérêt que les précédents ; pour les observer, il suffit de contuser rapidement une plante verte dans un mortier de porcelaine, de l'arroser d'alcool à 36° et de filtrer à l'abri d'une trop forte lumière. On observe dans le rouge une large bande très noire, une deuxième entre le rouge vif et l'orangé, une troisième à la naissance du jaune et du vert, une dernière enfin dans le vert ; au delà du bleu, l'absorption est complète, même avec des liqueurs très étendues. En solution concentrée, on ne voit qu'un peu de rouge.

M. Chautard considère la première bande comme spéci-

---

(1) Victor Fumouze, *Les spectres d'absorption du sang*, 1871.

(2) J. Chautard, *Les spectres de la chlorophylle*, 1875.

fique; elle persiste dans une solution contenant $\frac{1}{10000}$ de chlorophylle.

Les réactifs de la chlorophylle sont l'acide chlorhydrique et la potasse : le premier déplace la bande spécifique en reculant la limite du rouge; le second la dédouble et fait disparaître toutes les autres raies; cette dernière réaction s'effectue à chaud. Ce dernier caractère est extrêmement remarquable.

Il nous reste à étudier les gaz et les vapeurs colorés; l'acide hypoazotique donne les résultats les plus nets. Il suffit de quelques bulles de bioxyde d'azote dirigées dans le ballon décrit ci-dessus (*fig.* 120) pour produire dans le spectre une multitude de raies fixes groupées irrégulièrement.

Mêmes résultats avec le chlore, l'acide hypochloreux, les vapeurs d'iode ou de brome, etc.; reconnaissons toutefois qu'il serait difficile de baser une méthode analytique sur cette observation.

LXXIIIe MANIPULATION.

PHOTOGRAPHIE.

La Photographie est un art difficile, dont les débuts sont pleins de mécomptes et de déceptions; ce n'est point au laboratoire de Physique qu'il faut s'adresser pour l'acquérir, mais bien plutôt à l'atelier d'un praticien habile dont on étudiera les tours de main.

Je me bornerai à donner ici les formules des bains photographiques, en indiquant d'une manière générale la suite des opérations nécessaires pour obtenir un cliché et une épreuve positive. Ma seule prétention serait de mettre les élèves à même de reproduire, par exemple, les anneaux colorés, les franges d'interférence, ou quelque autre phénomène de ce genre, conformément à ce qui est exigé par le programme de la licence [1].

[1] On consultera avec fruit les Ouvrages suivants : *Premières Leçons de Photographie*, par M. Perrot de Chaumeux; *Manuel élémentaire de Photographie*

Théorie.

Une plaque de verre est recouverte d'une couche de collodion, solution de coton-poudre dans l'alcool et l'éther; l'éther s'évapore et il reste un voile opalescent de pyroxyle. L'iodure de potassium, de cadmium ou d'ammonium, qui avait été mêlé au collodion, se trouve donc étalé et fixé sur le plan de verre; qu'on vienne à le plonger dans un bain d'argent, il se forme de l'iodure d'argent qui prend un aspect laiteux et constitue une plaque sensibilisée.

On l'expose dans la chambre obscure; au sortir de là, le collodion ne porte aucune trace de l'action chimique qui s'est opérée, et l'on pourrait croire qu'il est resté insensible aux rayons lumineux qui l'ont frappé. Cependant l'action a été réelle, et il suffit, pour la rendre manifeste, de traiter la plaque par le protosulfate de fer; l'image apparaît aussitôt. L'iodure d'argent, qui a reçu l'impression lumineuse, est réduit suivant la formule

$$3(FeO, SO^3) + AgI = Fe^2O^3, 3SO^3 + Ag + FeI,$$

et l'argent est ramené à l'état métallique. Une addition d'alcool et d'acide acétique au sel ferreux facilite la réaction.

Mais l'image ainsi obtenue a besoin d'être renforcée; on emploie, à cet effet, l'acide pyrogallique. De plus, il faut la fixer et empêcher toute altération ultérieure; dans ce but, on la laisse digérer dans l'hyposulfite de soude, qui dissout l'iodure d'argent sur lequel la lumière n'a pas agi.

Cette épreuve est négative, c'est-à-dire que les points de l'image les plus obscurs sont ceux qui ont reçu le plus de lumière; on sait, en effet, que l'argent réduit est noir.

Pour tirer des épreuves définitives, on applique contre le cliché négatif du papier sensible sec au chlorure d'argent, et on l'expose au Soleil. L'action de la lumière ne s'exerce que

---

au collodion humide, à l'usage des commençants, par Dumoulin; *Les insuccès en Photographie*, par V. Cordier; *La Photographie rationnelle*, par A. Belloc; *Code de l'opérateur photographe*, par le même; *Traité général de Photographie*, par Monckhoven.

dans les points qui ne sont pas masqués par les noirs du négatif et il se produit un négatif du cliché, donc un positif de l'objet photographié.

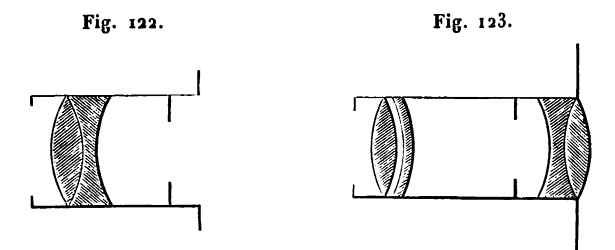
On termine par un virage dans un bain d'or et, comme ci-dessus, par un lavage à l'hyposulfite.

Description.

Le matériel nécessaire à la Photographie est considérable; nous nous contenterons d'en signaler les pièces principales.

En tête, nous placerons la chambre noire et l'objectif; nous recommandons spécialement les chambres à soufflet, préférablement aux chambres à tiroir. L'objectif peut être simple ou double : le premier (*fig.* 122) est excellent pour la reproduction des dessins, des gravures et de tous les objets plans en général; le second (*fig.* 123) est nécessaire pour les

Fig. 122. Fig. 123.



épreuves rapides qui exigent du modelé, mais il déforme les objets, et, employé pour le paysage, il donnerait à une maison une forme de pain de sucre; aussi emploie-t-on le premier pour les reproductions de vues. Les diaphragmes dont on munit les objectifs donnent de la finesse et de la netteté, mais augmentent la durée de la pose; on en fait varier le diamètre suivant le besoin.

Les appareils microphotographiques à amplification directe se forment très bien, en adjoignant un microscope inclinant à la chambre noire ordinaire; l'instrument est disposé horizontalement et il reçoit la radiation lumineuse, sans qu'on

soit obligé de la réfléchir sur aucun miroir; mais la platine du microscope est verticale, ce qui peut être un inconvénient pour la reproduction de certaines préparations. Cependant M. Louis Olivier a obtenu de la sorte les plus brillants résultats; il a conservé au microscope son oculaire plan-convexe et adapté à la chambre noire deux grandes lentilles achromatiques contiguës, dont l'antérieure est convexe-concave et la postérieure convexe-plane. Ces deux lentilles laissent entre elles un petit espace vide, leurs faces opposées appartenant à des sphères concentriques. L'effet de ces deux verres combinés est celui d'une lentille convexe-plane achromatique. Comme dans tous les appareils, une crémaillère et un pignon font avancer le tube de laiton et permettent la mise au point ([1]).

Les accessoires indispensables à la Photographie sont les suivants :

Une boîte à glaces;

Une planchette à nettoyer les glaces;

Deux cuvettes en porcelaine recouvertes par des feuilles de carton;

Un crochet de corne ou d'ivoire pour retirer les glaces des bains;

Un blaireau;

Une fontaine à eau distillée;

Un châssis pour tirer les épreuves positives.

COMPOSITION DES BAINS.

1° *Bain d'argent négatif.*

Eau distillée	100^{gr}
Nitrate d'argent cristallisé	8^{gr}
Iodure de potassium	25^{mgr}

Ce bain doit être légèrement acide; on y ajouterait quelques gouttes d'acide nitrique étendu, s'il ne rougissait pas le papier de tournesol.

([1]) *Recherches sur l'appareil tégumentaire des racines*, p. 159; 1881. Thèse inaugurale, Paris.

2° *Bain de fer à développer.*

Eau distillée............................	100gr
Sulfate de protoxyde de fer cristallisé.......	4gr
Acide acétique cristallisable...............	5gr
Alcool à 95°............................	4gr

ı en préparera 1^{lit} au moins, car les résultats que donne ıin sont meilleurs au bout de quelques jours qu'aussitôt s sa préparation.

3° *Liqueur à fixer.*

Eau distillée.............................	100gr
Hyposulfite de soude cristallisé.............	20gr

4° *Bain à renforcer.*

Eau distillée............................	100gr
Acide pyrogallique cristallisé..........	0gr,5
Acide acétique cristallisable...............	10gr
Alcool absolu...........................	9gr

ıtte solution s'altère; on en fera peu à la fois.

5° *Bain d'argent positif.*

Eau distillée.............................	100gr
Nitrate d'argent cristallisé..................	18gr

ırès que ce bain a servi quelque temps, il jaunit; on y alors 1gr de bicarbonate de soude ou de kaolin en poudre, ıgite, on ramène au volume primitif par addition d'une tion d'argent à 18 pour 100 et l'on filtre.

6° *Bain de virage.*

Eau distillée............................	100gr
Chlorure d'or...........................	0gr,1
Acétate ou phosphate de soude............	2gr

n fait dissoudre séparément les deux sels et l'on mêle les ides quelques heures avant de s'en servir; il faut qu'au

moment de l'employer le virage soit devenu incolore. On ne doit pas filtrer.

7° Bain de fixage.

Eau distillée	100gr
Hyposulfite de soude	25gr

Le collodion ioduré et le papier albuminé devront être achetés tout préparés.

Manuel opératoire.

I. *Épreuve négative :*

1° Les plaques de verre sont immergées pendant douze heures dans un bain alcalin, et une heure dans une solution acide; puis on les nettoie au tripoli, en les frottant avec un tampon imbibé d'alcool. Une glace bien nette, étant exposée au souffle, doit se recouvrir régulièrement de buée; c'est le meilleur moyen de s'assurer que le décapage et le polissage sont suffisants.

2° On prépare l'opération en filtrant le bain d'argent et en mettant l'appareil photographique au point.

3° Il est temps de collodionner la plaque; pour cela, on la brosse légèrement au blaireau et l'on verse le collodion près de l'angle opposé à celui par lequel on tient le verre; puis, doucement et sans précipitation, on incline la plaque de manière à la recouvrir entièrement. L'excédent est déversé dans le flacon de collodion (*fig.* 124).

4° Aussitôt que la glace a pris l'apparence d'un verre dépoli, on l'immerge dans le bain d'argent d'un seul coup. Au bout d'une minute environ, on la relève à l'aide du crochet et l'on examine si le liquide à la surface présente des traînées huileuses; dans ce cas, on la replonge dans le bain et on l'y laisse encore une demi-minute environ. Quand on la retire, la couche doit présenter une nappe blanche d'apparence laiteuse, sans taches graisseuses. On laisse égoutter un instant la glace et on l'enferme dans le châssis.

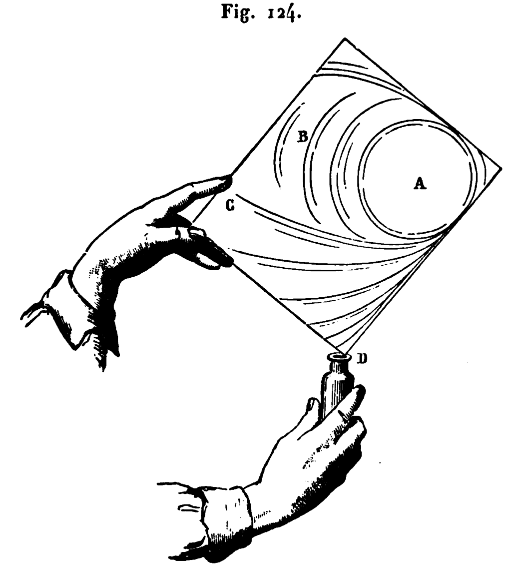
5° On vérifie une dernière fois la mise au point et, le châssis

nt en place dans l'appareil, on lève la planchette à coulisse. ›st impossible de rien préciser relativement à la durée de pose.

5° Pour développer l'image, on y déverse, à l'aide d'un rre à pied, la solution de sulfate ferreux; les grandes lu-ères apparaissent en noir.

7° Dès que l'image ne gagne plus en intensité, on la lave us le robinet d'une fontaine.

Fig. 124.



}° Il est rare que le bain de fer suffise pour amener l'é-uve au point voulu; on la renforce, en y versant la solu-n pyrogallique, additionnée de quelques gouttes d'une ution faible de nitrate d'argent. On lave encore à grande ı.

° Le fixage se fait dans une cuvette sous une épaisseur 10mm de liquide. Les parties blanches deviennent transpa-tes, de jaune opalin qu'elles étaient. On finit par un dernier ge avant de vernir le cliché.

. *Épreuve positive :*

' La sensibilisation du papier se fait en l'appliquant à la

surface du bain d'argent pendant cinq minutes; on le suspend pour le faire sécher.

2° Le papier est disposé contre le cliché, dans le châssis, et exposé à la lumière diffuse; il est difficile d'indiquer le temps nécessaire au tirage de l'épreuve; la coloration qui semble suffisante doit être dépassée, car les tons perdent de leur valeur dans les opérations subséquentes.

3° Le virage commence dans un bassin d'eau pure; dans le bain d'or, les teintes foncées tournent au violet; l'épreuve est ensuite reportée dans l'eau.

4° Le fixage se fait dans une cuvette; il exige quinze minutes. Le bain sera toujours neuf, mais il peut être de préparation ancienne.

5° Un dernier lavage, qui doit être prolongé une dizaine d'heures, achève l'opération; il ne reste plus qu'à sécher, coller et encaustiquer l'épreuve. Le vernis et l'encaustique devront être achetés.

Causes des insuccès [1]. — En Photographie, il faut s'attendre à tout, même à ne pas avoir d'épreuve; cela peut tenir à l'une des causes suivantes :

Dérangement des verres de l'objectif, ou lentilles couvertes de buée; pose trop courte; lumière trop faible; voiles empêchant ou détruisant l'épreuve; manque d'iodure dans le collodion; bain d'argent trop alcalin ou trop acide; bain trop pauvre, chargé de matières organiques; bain de fer peroxydé.

Les voiles, effaçant plus ou moins l'épreuve, peuvent être causés par l'action intempestive de la lumière ou quelquefois par des émanations réductrices, sulfureuses ou ammoniacales; mais, le plus souvent, ils sont dus à un défaut de netteté des glaces, ou à l'emploi de substances impures ou mal proportionnées. Les voiles apparaissent encore, lorsque le développement a été continué trop longuement, surtout si les développateurs ne contiennent pas assez d'acide acétique. Trop de retard dans le développement donne aussi des voiles accompagnés de taches et de points blancs; le délai maximum, entre l'instant où l'on retire la glace du bain d'ar-

---

(1) Je renvoie le lecteur à l'excellent Traité de M. Cordier, qu'il est impossible de résumer en quelques lignes.

gent et celui où l'on développe, ne doit pas dépasser cinq minutes en été et dix en hiver.

Il se produit souvent des teintes rousses au développement; elles sont causées par un collodion, bain d'argent ou révélateur trop alcalins, et quelquefois par un excès de lumière dans le laboratoire. Une pose trop longue donne aussi une teinte uniformément rouge, sur laquelle se dessinent confusément les détails de l'objet.

Une des recommandations les plus pressantes à faire aux commençants est d'avoir la plus exquise propreté et de conserver les bains dans toute leur intégrité; il suffit de quelques gouttes d'hyposulfite dans un bain quelconque, ou d'un lavage insuffisant, pour compromettre une série d'épreuves.

Les causes d'insuccès ne sont pas moins nombreuses pour les positifs sur papier. Un bain d'argent trop faible donne à l'épreuve une couleur rouge terne au sortir des châssis; un virage insuffisant conduit à une épreuve rouge après fixage, tandis qu'elle est bleue quand le virage a été trop prolongé. Une épreuve jaune dans les blancs, ayant une apparence fanée, accuse un vice général de l'opération ou des bains, et le plus souvent elle témoigne d'une insuffisance de lavage. Les piqûres des parties foncées tiennent à un fixage imparfait.

Les écueils sont si nombreux, qu'il est impossible d'obtenir dans les commencements des épreuves irréprochables; mais avec de la patience, beaucoup de soins et les conseils d'un praticien, on arrivera rapidement à la perfection relative qu'on est habitué d'exiger des gens du métier, et au-dessous de laquelle un physicien serait honteux de rester, du moment que, produisant ses œuvres, il s'expose au jugement de tous.

CHAPITRE XIV.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

LXXIVe MANIPULATION.

ÉTUDE DU MICROSCOPE : SON GROSSISSEMENT.

Bien que les études micrographiques ne soient pas mentionnées explicitement dans le programme de la licence ès sciences physiques, il nous a paru utile d'indiquer succinctement les conditions auxquelles doit satisfaire un bon microscope : nous y joindrons le manuel opératoire de la détermination expérimentale du grossissement et de la mesure des grandeurs.

Théorie.

Les spécialistes distinguent les pouvoirs définissant, pénétrant et résolvant des objectifs.

Le degré suivant lequel ont été corrigées les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité contribue au pouvoir définissant.

Le pouvoir pénétrant se dit du plus ou moins de facilité qu'on éprouve à distinguer les parties d'un corps qui se trouvent en dehors du foyer; cette propriété dépend encore de la perfection apportée à la correction des aberrations, et elle est liée de plus à l'angle d'ouverture. L'angle d'ouverture est égal au rapport de la longueur focale de l'objectif à son diamètre utile.

Le pouvoir résolvant est le contraire du pouvoir pénétrant; est la faculté de saisir des objets très délicats, distribués à surface des objets. Alors que le pouvoir pénétrant est aximum avec le plus petit angle d'ouverture, le pouvoir ;solvant devient minimum.

La propriété d'analyser les moindres détails d'un objet est ;surément précieuse, mais elle annule le plus souvent les ɜux qualités précédentes et elle n'est pas à rechercher dans n grand nombre de cas; ce qu'il faut exiger avant tout, c'est ne parfaite correction de l'aberration sphérique et chroma-.que.

Le calcul ne peut donner la mesure du grossissement, car . repose sur la connaissance des distances focales des lentilles, qu'il est impossible de déterminer avec une approximaion suffisante. Le meilleur et peut-être l'unique moyen de nesurer l'amplification consiste à estimer la grandeur appa-'ente des divisions d'un micromètre objectif à l'aide d'un mi-;romètre oculaire.

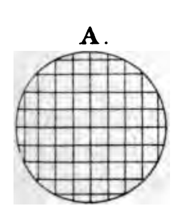
Description.

C'est par l'observation de certains *test-objets* qu'on apprécie es qualités d'un microscope.

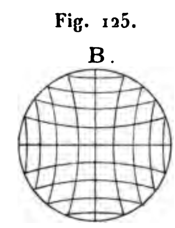
On emploie fort utilement un micromètre de verre A *fig.* 125), divisé en carrés égaux, ou bien encore des organes

Fig. 125.

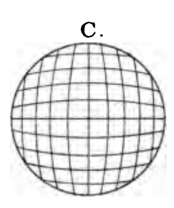
A.



B.



C.

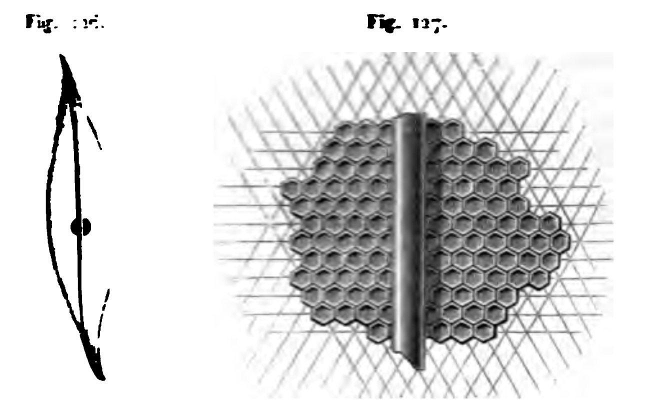


e plantes ou d'animaux d'une texture assez délicate et assez ne, pour que leur examen permette de juger des qualités ptiques de l'instrument. Telles sont les écailles des ailes du *'apilio janira* ou les enveloppes siliceuses des Diatomées et pécialement du *Pleurosigma angulatum.* Ce dernier test

(fig. 126) présente plus de 1300 stries parallèles par millimètre; on ne les voit guère qu'en éclairage oblique, si l'on emploie un objectif faible; en recourant à des grossissements de plus en plus considérables, on découvre bientôt trois séries de raies inclinées de 60°, circonscrivant de petites alvéoles hexagonales (fig. 127), qu'il faut examiner avec un éclairage central, par un objectif à immersion, pour bien discerner tous leurs détails.

Le micromètre objectif consiste en une lame de verre sur laquelle sont tracées au diamant des divisions équidistantes, correspondant au $\frac{1}{100}$ de millimètre; on le pose directement sur la platine de l'instrument.

Fig. 126. Fig. 127.



Le micromètre oculaire est formé d'une lame divisée comme la précédente qu'on place dans l'oculaire, entre la loupe et le verre de champ; sa graduation représente des dixièmes de millimètre. On le fixe exactement au foyer du verre supérieur, au point où vient se former l'image objective; le pouvoir grossissant de la loupe étant égal par exemple à 10, chaque dixième devient un millimètre.

Manuel opératoire.

1. *Essai du microscope :*

La mise au point se fait en approchant plus ou moins l'ob-

ctif de l'objet, à l'aide d'un jeu de vis et de crémaillère, sans ıanger le tirage de l'oculaire.

Avant tout, on doit constater que le champ visuel est tout à it plat; le micromètre A de la *fig.* 125 est destiné à en moigner. En effet, on verrait les lignes extrêmes se courber ımme en B ou en C, au cas où la correction de sphéricité :rait défectueuse, et les points périphériques du champ s'é-ınouiraient comme dans un nuage.

L'aberration chromatique ne peut être corrigée entièrement, ar il n'existe aucun moyen de faire disparaître le spectre se-ondaire; mais les constructeurs spéciaux sont bien près l'atteindre à la perfection. Ils corrigent généralement par :xcès pour donner au champ un contour bleuâtre, qui ne léplaît pas à l'œil; les objectifs corrigés par défaut présen-ent, au contraire, des bords orangés; en réalité, les résultats ıe sont guère différents.

Un moyen d'épreuve assez simple consiste à examiner une ame de verre très légèrement enfumée, à la surface de la-uelle on trace quelques signes avec la pointe d'une aiguille 'ès déliée, soutenue bien verticalement; promenant ces nages dans le champ, on doit voir leurs contours rester galement vifs et nets, sans irisations et brouillards d'au-une sorte, même avec les plus forts oculaires. Un objectif ui définit mal donnerait une image empâtée, aux contours pais.

L'observation des test-objets n'est point aisée, et les novices ıicrographes éprouvent quelquefois une certaine difficulté à es découvrir dans le champ de leur instrument; mais cette echerche est pour eux une excellente école qui leur apprend . mettre rapidement et exactement au point, et à tirer parti les divers éclairages. D'autre part, les test-objets permet-ent d'apprécier avec une grande sécurité la valeur résolutive les objectifs puissants. Le *Pleurosigma angulatum*, examiné d'abord avec un objectif grossissant quatre-vingts fois, paraît uni; avec l'éclairage oblique, on entrevoit déjà les stries; les alvéoles saillantes ne deviennent nettes qu'avec les plus forts objectifs, doués d'une grande puissance résolutive.

Les réseaux de Nobert et de Brünner peuvent aussi servir ı cette étude; on découvre ainsi des différences nombreuses

dans le tracé des traits : elles sont produites par la pression plus ou moins grande exercée sur la pointe de diamant.

II. *Mesure du grossissement* :

Cette mesure consiste simplement à chercher combien de divisions du micromètre objectif sont renfermées, par exemple, dans dix divisions du micromètre oculaire [1]; supposons qu'il y en ait vingt-cinq : cela signifie qu'une longueur de $0^{mm},25$ donne une image objective égale à 10^{mm}, d'où il résulte que

$$G = \frac{10}{0,25} = 40 \text{ diamètres.}$$

On construit de la sorte, pour tous les objectifs, une Table indiquant pour chacun d'eux le pouvoir amplifiant du microscope.

III. *Mesure du diamètre d'un objet* :

Elle ressort directement de ce qui précède, car nous savons maintenant à quel diamètre correspond une division du micromètre oculaire : c'est, pour l'objectif étudié ci-dessus, $0^{mm},025$. Il suffit, dès lors, de compter le nombre des divisions du micromètre oculaire, entre lesquelles l'image de l'objet est comprise, et de le multiplier par 0,025, pour obtenir la valeur absolue du diamètre de cet objet.

Nous ferons observer seulement la nécessité de conserver constante la longueur du corps du microscope; elle doit être la même que dans l'opération qui a conduit à la mesure du grossissement.

Ces procédés de mesure sont rigoureusement exacts, mais ils supposent que la loupe de l'oculaire a un grossissement bien connu; or, on éprouve une grande difficulté à obtenir des constructeurs des micromètres oculaires dont le verre supérieur ait un pouvoir grossissant déterminé.

Remarquons encore que le pouvoir amplifiant ainsi mesuré correspond à l'oculaire employé; quand on change d'oculaire, les rapports varient aussi, et l'on ne possède plus de base exacte d'appréciation. Il n'existe pas, en effet, de procédé

---

[1] On éprouve quelquefois aussi de la difficulté à trouver les divisions des micromètres objectifs : qu'on mette au point d'abord pour les bords, et cette recherche sera grandement facilitée.

qui donne correctement le grossissement de chaque objectif avec tous les oculaires successivement ([1]).

On enseigne généralement que, par un acte de perception se passant dans les centres nerveux, l'image est à la distance qu'on dit être celle de la vision distincte.

Il est facile de s'assurer par expérience que cette assertion n'est pas exacte; ainsi que M. Robin l'a démontré, plus le pouvoir amplifiant est considérable, plus l'image est reportée loin, sans jamais atteindre toutefois la distance de la vision distincte. Ce fait a une grande importance, car il explique les erreurs énormes auxquelles on est conduit, quand on accepte pour grossissement d'une loupe le quotient de la vision distincte, prise égale à $0^m,22$, par la longueur focale.

Pour établir cette proposition ([2]), M. Robin mesure exactement les dimensions de l'image d'un objet déterminé, à l'aide du micromètre oculaire, et il le reproduit sur une feuille de papier; puis il cherche à quelle distance de l'œil il faut placer ce dessin, pour que ses dimensions coïncident exactement avec celles de l'image vue dans le microscope. Cette comparaison peut se faire sans difficulté par la chambre claire; on obtient les résultats suivants :

Pouvoir amplifiant.	Dimensions de l'image dans le microscope.	Distance à laquelle le dessin est vu avec les mêmes dimensions.
	mm	mm
100	9,5	120
200	19	125
400	38	135

Avec un grossissement de 1500 diamètres, le plus fort qu'on ait pu atteindre réellement, la distance est encore moindre que 220^{mm}, quel que soit le point de vision distincte des individus; il est donc bien vrai que l'image n'est pas reportée à la distance du *punctum proximum*.

Nous en conclurons que la détermination du grossissement par le procédé de la double vue et à l'aide de la chambre

---

([1]) Ch. Robin, *Traité du Microscope;* Heinrich Frey, *Le Microscope*, traduction Spielmann.

([2]) Robin, *loc. cit.*, p. 130.

claire est inexacte, lorsqu'on place son papier à 220^{mm} comme le prescrivent quelques Traités; c'est ainsi qu'on a pu trouver ces amplifications fantastiques de 3000 diamètres. La chambre claire ne doit servir qu'à reproduire par le dessin des objets que l'observateur se reconnaît incapable de dessiner à main levée.

LXXVe MANIPULATION.

GROSSISSEMENT DE LA LUNETTE.

Théorie.

On démontre, en Optique géométrique, que le grossissement de la lunette est égal au rapport du diamètre de la portion libre de l'objectif au diamètre de l'anneau oculaire, qui est son image. Une méthode très simple de détermination du grossissement est fondée sur cette propriété; elle est connue sous le nom de Ramsden.

Le P. Schröter et, après lui, Herschel effectuaient la même mesure, en comparant l'image envoyée à l'œil droit par la lunette à l'objet vu directement par l'œil gauche; Pouillet perfectionna ce procédé en employant une sorte de chambre claire, qui permet de superposer 'image d'une mire de grandeur connue avec son image.

Nous emploierons tour à tour ces deux méthodes.

Description.

Ramsden imagina le *dynamètre* pour mesurer le diamètre de l'anneau oculaire; c'est un micromètre de verre, divisé au $\frac{1}{10}$ de millimètre, monté dans un tube (*fig.* 128); on l'observe au moyen d'une loupe à tirage variable.

Le diamètre de l'objectif se mesure au compas.

hambre claire de Pouillet se compose de deux miroirs ayant leurs surfaces réfléchissantes en une de l'autre et inclinées de 45° sur le la lunette. Le miroir placé devant st percé d'un petit trou, par lequel on e l'image fournie par la lunette; cet nent se fixe sur l'oculaire au moyen is vis. La mire que l'on vise mesure iron, divisé en centimètres; elle s'ap- contre un mur à une distance de 20^m ins.

Fig. 128.



Manuel opératoire.

rocédé de Ramsden :

a lunette est réglée pour voir à la plus grande dis- possible.

lle est braquée sur le ciel et l'on applique le dynamètre l'oculaire, de manière que l'image de l'objectif vienne mer avec une netteté parfaite; on cherche la position aquelle le diamètre de cette image est minimum. Ce tre sera mesuré au $\frac{1}{20}$ de millimètre, au jugé.

our obtenir la mesure du diamètre de l'objectif, on ap- sur la surface de la lentille les deux pointes très fines ompas et l'on fait en sorte que leur image coïncide avec trémités du diamètre de l'anneau oculaire. Portant alors npas sur une règle graduée, on évalue l'écartement des s au $\frac{1}{4}$ de millimètre.

este à diviser cette distance par le diamètre de l'anneau.

Méthode de Pouillet :

observant la mire à travers la lunette, on superpose les images : supposons que la vision naturelle du mètre de avec la longueur amplifiée de $0^m,04$; le grossisse- sera de vingt-cinq fois.

Résultats.

ésulte de ce qui précède qu'on peut obtenir le même issement avec des objectifs de grandeur très différente;

mais on leur donne ordinairement le plus grand diamètre possible, parce que, à grossissement égal, la clarté de l'image est proportionnelle à la surface de l'objectif. On a construit des lunettes astronomiques grossissant 3500 fois, avec des oculaires dont la distance focale n'est que de quelques millimètres.

Il est inutile de faire observer que, dans la lunette de Galilée, l'image de l'objectif donnée par l'oculaire est virtuelle, et qu'il n'y a donc pas à proprement parler d'anneau oculaire : il faut nécessairement recourir à la seconde méthode pour déterminer son grossissement qui ne dépasse guère 5 à 8.

CHAPITRE XV.

OPTIQUE PHYSIQUE.

LXXVIe MANIPULATION.

ÉTUDE GÉNÉRALE DES PHÉNOMÈNES D'INTERFÉRENCE ET DE DIFFRACTION.

Je considère cette manipulation comme une introduction iécessaire à la haute optique : avant de faire exécuter par des :lèves les mesures délicates des longueurs d'onde, le proesseur sent le besoin de les familiariser d'abord avec les phéıomènes, nouveaux pour eux, des interférences et de la difraction; en répétant eux-mêmes les plus belles expériences lu cours, ils peuvent en étudier à loisir les diverses appaences et comparer les résultats variés qu'on obtient en suerposant des ondes de phase, de période et de nature difféentes.

Description.

L'instrument qui présente le plus de ressources est, d'après · Mascart, le spectroscope; ce savant l'a prouvé surabonımment dans un travail auquel nous ferons de nombreux nprunts (¹).

Il suffit qu'on puisse disposer, entre le collimateur et la ınette, à la place du prisme, les biprismes de Fresnel ou de lascart et les fiches qui se placent sur le banc d'optique

(¹) *Journal de Physique*, I, p. 17 et 177; 1872.

pour observer les franges d'interférence et de diffraction; il est même possible de les mesurer au $\frac{1}{100}$ de millimètre à l'aide d'un micromètre oculaire semblable à celui que nous avons décrit dans la LXXIVe *Manipulation*.

Comme toute la lumière qui sort du collimateur est concentrée par la lunette dans le voisinage des points où se produisent les phénomènes que l'on veut observer, on peut utiliser des sources de lumière très faibles et une bougie suffirait au besoin; cependant il sera préférable de se servir d'une lampe à pétrole ou d'un bec de gaz, dont la flamme sera vue par la tranche.

Pour les expériences que je viens d'énumérer, il faut enlever le prisme de sa plate-forme; mais les interférences à grandes différences de marche s'étudient dans le spectre, par le procédé de MM. Fizeau et Foucault, et le même instrument se prête à une étude très complète et très intéressante de ces curieux phénomènes.

En disposant en avant du spectroscope un collimateur à fente et une lunette sans oculaire, on reproduit le phénomène des lames mixtes de Yung. Enfin il est facile de fixer en avant de la fente et devant l'oculaire un polariseur et un analyseur; on étudie ainsi les franges produites dans le spectre par la double réfraction et la polarisation rotatoire.

Bref, l'adjonction au spectroscope de quelques accessoires peu dispendieux permet de répéter les expériences les plus célèbres de l'Optique physique (1).

Manuel opératoire.

I. *Sans prisme :*

1° Le biprisme de Fresnel ou de Pouillet étant disposé sur la plate-forme, on observe de belles franges; par suite de la dispersion, les franges violettes sont un peu plus larges que lorsqu'on opère avec les miroirs. Le phénomène est plus bril-

(1) Notre laboratoire de la Faculté libre de Lille possède un spectroscope, disposé par M. Laurent, pour l'étude des interférences : cet instrument permet de réaliser toutes les expériences qui suivent.

lant, quand la lumière qui sort du collimateur est fortement convergente : la fente sera donc placée au delà du foyer principal de la lentille.

En plaçant le biprisme entre l'œil et l'oculaire de la lentille, on obtient aussi des franges.

On observe encore très nettement ce phénomène, en ôtant l'objectif de la lunette ou celui du collimateur.

2° M. Mascart a accolé deux prismes par leurs arêtes, au lieu de le faire par leurs bases; les franges produites de la sorte sont extrêmement fines. Pour les voir, il faut supprimer le verre de champ de la lunette et fixer l'oculaire sur un support séparé, à 300^{mm} environ de l'objectif; on peut employer à cet effet un simple tube de carton, entrant à frottement dur dans le tube de la lunette.

3° Les deux trous du P. Grimaldi donnent au Soleil des franges verticales, qu'on voit bien dans la lumière rouge; on les fait disparaître en masquant une des ouvertures par une lamelle de mica.

4° Le bord d'un écran fait naître des franges extrêmement fines, difficiles à saisir; il convient d'éloigner le plus possible l'oculaire de l'objectif.

5° Deux fentes parallèles produisent de larges bandes colorées, qui se déplacent quand on recouvre une des fentes de mica.

6° Dans l'ombre d'un gros fil se voient deux franges très noires; quand le fil est fin, il faut sortir l'oculaire le plus possible, et alors l'image est bordée de raies violettes et rouges, le violet en dedans.

7° Avec un réseau, on peut observer, de chaque côté de l'image de la fente, trois et même quatre spectres très nets, dont nous ferons dans la suite une étude plus complète.

8° Le même réseau donne, par réflexion, les irrisations chatoyantes de la nacre de perle; le bouton de Barthon jette des feux colorés très vifs.

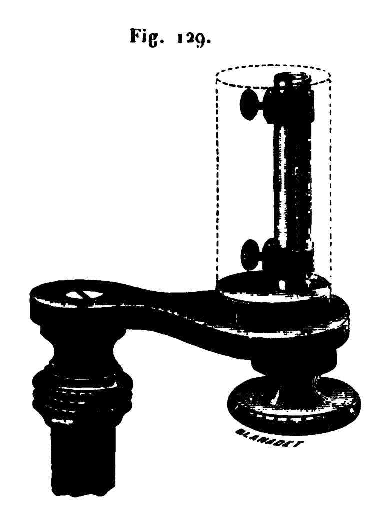
9° Un verre saupoudré de lycopode montre des couronnes qui présentent encore le violet en dedans; c'est la manière la plus simple de construire le stéphanoscope de Delezenne et de reproduire les apparences des cercles, qui encadrent quelquefois le disque du Soleil. Les anneaux, qu'on voit, le matin

en se levant, autour d'une vive lumière, ont la même origine; ils sont dus aux globules de sang dont la conjonctive s'est injectée durant le sommeil.

II. *Avec le prisme :*

1° L'appareil de de Wrede (*fig.* 129) permet très simplement d'observer les interférences produites par réflexion sur les lames minces; il se compose d'un petit cylindre vertical,

Fig. 129.



de 8mm de diamètre, percé d'une fenêtre fermée par une lame courbe de mica sur laquelle on dirige un faisceau de lumière. La fente du collimateur étant éclairée par les rayons réfléchis sur cette lame, on voit le spectre sillonné de bandes noires et brillantes dont l'écartement augmente, en allant du rouge au violet; en versant dans le cylindre un liquide possédant le même indice de réfraction que le mica (1,53), tel que l'essence de cassia, on fait disparaître les franges, ce qui prouve que le phénomène était dû à l'interférence des rayons réfléchis sur les deux faces du mica.

Dans les laboratoires où l'on manquerait de l'appareil de de Wrede, on pourrait disposer une lame de mica obliquement derrière l'oculaire, et observer l'image du spectre qu'elle réfléchit; inutile de dire que l'expérience est moins belle.

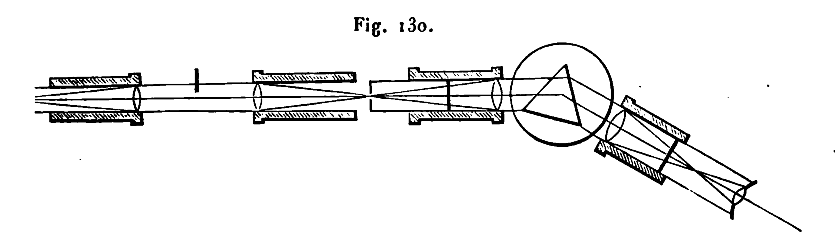
L'épaisseur maximum de la lame sera de $\frac{1}{100}$ à $\frac{2}{100}$ de millimètre.

Des lamelles de verre de $\frac{1}{10}$ de millimètre donnent les mêmes apparences, à condition toutefois que leurs faces soient bien parallèles.

2° En interceptant le faisceau lumineux par une lame mince de mica ou de verre appliquée derrière l'oculaire, de manière à couvrir entièrement la pupille, on observe un spectre à bandes qui correspond aux anneaux transmis de Newton. Les bandes sombres que l'on aperçoit ne sont plus noires comme précédemment, mais simplement ombrées. Cette expérience, imaginée par Ermann, présente de curieuses analogies avec celle des anneaux.

3° Lorsque les deux faisceaux interférents traversent des

Fig. 130.



épaisseurs égales de deux milieux inégalement réfringents, on observe encore des spectres à bandes; ils correspondent au phénomène des lames mixtes de Yung.

La disposition de cette expérience est présentée par la *fig.* 130.

En avant de la fente du spectroscope, on dispose un collimateur à fente et une lunette sans oculaire et l'on fait tomber l'image linéaire de la première fente sur la seconde.

Pour produire les franges d'interférence dans le spectre, il n'y a qu'à interposer sur le chemin des rayons une lame de verre d'environ $\frac{1}{8}$ de millimètre d'épaisseur.

4° En remplaçant le prisme de verre du spectroscope par un prisme à liquide dans lequel on introduit une lame réfringente, on voit encore le spectre sillonné de bandes : c'est l'expérience de Baden-Powell.

5° Talbot et après lui Esselbach glissaient une lamelle de

verre entre l'œil et l'oculaire, de manière à couvrir la moitié de la pupille, du côté du violet : les franges qui se forment dans le spectre leur permettaient de mesurer la longueur d'onde des radiations extrêmes. Ces franges, connues sous le nom de Talbot, ne se produiraient pas si l'on interceptait les radiations du côté du rouge.

III. *En lumière polarisée :*

1° Si l'on dispose un prisme de Nicol devant la fente du spectroscope, puis derrière le collimateur une lame biréfringente, taillée parallèlement à l'axe, et enfin devant l'oculaire un analyseur, on reproduit une des plus belles expériences de MM. Fizeau et Foucault (1).

Le spectre présente un grand nombre de bandes qui sont absolument noires, si les sections principales du polariseur et de l'analyseur sont parallèles et si la section principale de la lame est inclinée à 45°. Un morceau de quartz à faces parallèles de $54^{mm},6$ fait voir plus de 600 bandes et l'on peut en compter 89 entre les raies E et F. Une lame de spath de $4^{mm},79$ en produit au moins 1000, dont 155 entre les mêmes raies E et F. Une feuille de gypse clivé donne aussi de beaux résultats.

2° Reproduisons la même expérience, mais analysons le spectre en faisant varier la position du nicol devant l'œil : nous verrons l'intensité relative des bandes subir de grandes modifications, attendu que les rayons sont polarisés rectilignement, circulairement ou elliptiquement.

3° En remplaçant la lame cristalline par un quartz de $0^{m},040$ à $0^{m},050$ d'épaisseur, taillé perpendiculairement à l'axe, on observe de larges bandes d'extinction qui sont dues à la polarisation rotatoire.

En faisant tourner l'analyseur comme ci-dessus, on voit encore ces bandes se déplacer. Le quartz est dextro ou lévogyre suivant qu'il faut tourner l'analyseur à droite ou à gauche pour faire marcher les franges vers le violet du spectre.

Une séance de deux heures suffit pour faire passer sous les yeux des élèves les plus belles expériences de l'Optique.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, XXVI, p. 145.

LXXVIIe MANIPULATION.

VÉRIFICATION DES LOIS EXPÉRIMENTALES DES ANNEAUX COLORÉS DE NEWTON.

Théorie.

Ne nous occupons que des anneaux réfléchis; les lois du phénomène sont les suivantes :

1° En lumière homogène et sous une incidence normale, les carrés des diamètres des anneaux noirs successifs sont entre eux comme la série des nombres pairs.

2° Sous une incidence oblique, les diamètres qui correspondent à un anneau d'un ordre déterminé sont proportionnels à la sécante de l'angle que fait le rayon avee la normale dans la lame mince.

Newton mesurait les anneaux à l'aide d'un compas, non sans difficulté ([1]); Babinet traçait une division sur l'une des surfaces limitant la lame mince; mais ces procédés étaient imparfaits et il fallait en corriger les résultats pour tenir compte de la réfraction subie par les rayons au passage de la lentille supérieure. MM. de la Provostaye et Desains imaginèrent une méthode, aussi simple que rigoureuse, par laquelle ils purent vérifier l'exactitude des lois théoriques jusqu'au 67e anneau, pour des incidences de 86°, en éliminant toute correction.

Le travail de ces savants physiciens a une grande importance historique; car, en établissant l'accord entre les résultats de l'expérience et du calcul, ils donnèrent une réponse péremptoire à une grave objection soulevée par Herschel contre la théorie des ondes : Fresnel ne l'avait écartée qu'en mettant en doute l'exactitude de la loi.

([1]) « Res admodum difficilis est multæque diligentiæ hujusmodi mensuras accurate et sine errore colligere. » (*Optique.*)

Description.

Les anneaux sont formés à l'ordinaire entre une lame de verre plane et une lentille plan-convexe (¹). Ce système est monté sur le chariot de la machine à diviser; en face on dispose, sur un support fixe, un théodolite dont le cercle vertical est perpendiculaire à l'axe de la vis micrométrique. La lunette étant inclinée de façon que le fil horizontal de son réticule passe par le centre des anneaux, il suffit de faire tourner la vis de la machine pour que ceux-ci viennent successivement toucher le second fil aux points où ils sont coupés par le premier. En notant exactement la position de la tête du micromètre chaque fois que l'un de ces contacts a lieu, on peut, par de simples soustractions, mesurer les diamètres correspondants des anneaux.

Cette disposition est représentée par la *fig.* 131. Le dessinateur n'a pas indiqué la source de lumière employée pour éclairer la lentille.

MM de la Provostaye et Desains se servaient d'une lampe à alcool salé à double courant, sans cheminée de verre : les rayons étaient transmis à travers une feuille de papier huilé ou un verre dépoli dressé verticalement devant la lampe. On obtient une flamme très pure en remplaçant l'alcool par un mélange de quatre parties d'esprit de bois et d'une partie d'alcool absolu.

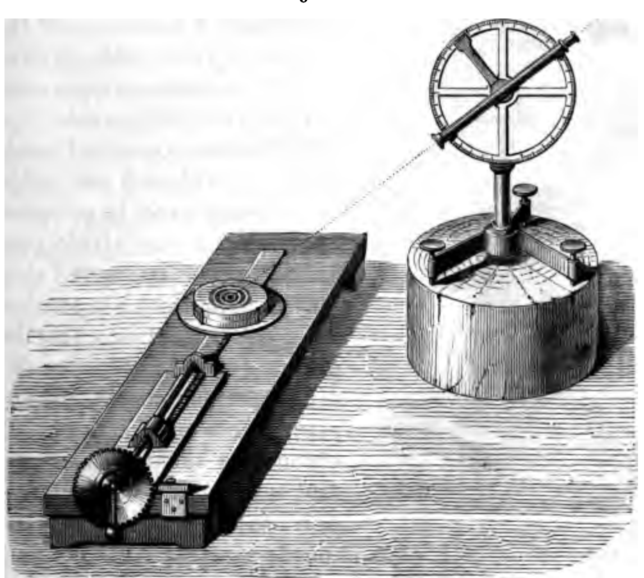
L'éolipyle Laurent donne une lumière jaune plus intense : c'est un excellent appareil qui mérite une description spéciale. Il se compose essentiellement d'une lampe L (*fig.* 132), d'une chaudière H en cuivre rouge et de deux brûleurs T surmontés d'une cheminée : le sel est introduit dans la flamme à l'aide des cuillers G. E est une soupape de sûreté dont on voit les détails sur la droite du dessin.

L'éolipyle peut être chargé d'alcool ou d'esprit de bois : pour verser le liquide on enlève la soupape. Il est prudent de s'assurer que cette soupape n'est pas collée sur son siège et

(¹) *Annales de Chimie et de Physique*, 3ᵉ série, XXVII, p. 423 ; 1849.

ue l'orifice V par lequel s'écoule la vapeur d'alcool est libre : n le débouchera au besoin à l'aide d'une aiguille fine en dé-issant le tube T; ces précautions ne sont pas inutiles. On 'enflamme la vapeur qu'au moment où se fait entendre un éger crépitement produit par la sortie du jet, trois ou quatre ninutes après avoir allumé la lampe L. S'il est trop tôt, la lamme descend dans les tubes T : il suffit alors, pour éteindre,


Fig. 131.



e fermer les trous d'air en tournant la virole I. Lorsque la ression est suffisante, les flammes brûlent avec un petit cône ntérieur violet : en marche régulière, on entend un bruit accadé, assez rapproché et très régulier, qui témoigne d'un on fonctionnement et sert de contrôle.

Le gaz est souvent préférable à l'alcool quand il brûle tranquillement et qu'on dispose d'une pression suffisante d'au moins 30^{mm} d'eau : on emploie alors un bec de Bunsen dont on rendra d'abord la flamme parfaitement incolore. Un fil de platine ou une petite corbeille permet d'introduire une perle

de sonde ou de sel, dans le bord de la flamme du côté de l'observateur.

On fait les perles en mouillant un peu l'extrémité recourbée du fil de platine et en le trempant dans le sel qu'on fond ensuite à la flamme. On répétera plusieurs fois cette opération de manière à obtenir une perle de belle grosseur : elle servira longtemps à condition de la retirer de la flamme dès qu'on aura fini l'observation et de la conserver dans une boîte sèche.


Fig. 132.



M. Laurent construit aussi un excellent brûleur à gaz, qui peut fonctionner avec la pression la plus faible : une virole permet de régler l'admission de l'air proportionnellement à la tension du gaz d'éclairage. Une corbeille de platine reçoit le chlorure de sodium préalablement fondu en plaques ou en grains [1]. Pour obtenir le maximum d'effet il faut toujours que la cuiller soit, non pas au milieu de la flamme, mais bien sur le côté, dans la partie violacée. On évitera avec soin que le sel en fondant ne vienne à tomber sur l'orifice du gaz et l'obstruer.

Manuel opératoire.

1° Le théodolite est d'abord solidement installé : son axe doit être vertical et le plan du limbe perpendiculaire à l'axe de la machine. On le laisse fixe pendant toute la durée des

---

(1) On vend dans le commerce du sel fondu en plaques que l'on casse en petits morceaux : il doit être conservé dans un lieu bien sec.

expériences; lorsqu'on veut changer l'inclinaison, on déplace la machine à diviser, en la transportant parallèlement à elle-même.

2° La surface supérieure des verres, entre lesquels se développent les anneaux, doit être horizontale. Le plan inférieur est d'abord réglé par les vis calantes de son support; puis on y superpose la lentille en la frottant légèrement sur le plan, et l'on s'assure qu'en faisant tourner le système des deux verres le diamètre d'un anneau particulièrement visé n'éprouve aucune variation. L'exacte horizontalité de la face supérieure est dès lors assurée.

Un centre noir doit apparaître au milieu des anneaux; une certaine friction est nécessaire pour réaliser cette condition, mais il ne faut point qu'elle soit trop forte, sinon on pourrait déformer les surfaces en contact.

3° On mesure les diamètres sous une incidence voisine de la normale en amenant sous le fil les parties les plus sombres de chaque bande obscure. La tache centrale compte comme premier anneau.

Il y a avantage à éclairer le réticule en pratiquant une petite ouverture dans l'oculaire en face des fils : la lumière d'une bougie assez éloignée suffit pour les rendre apparents.

4° On fait varier l'inclinaison de la lunette pour vérifier la loi des sécantes.

Dans les cas de grandes inclinaisons, les anneaux sont noyés dans une forte proportion de lumière réfléchie à la première surface du verre supérieur. Il est nécessaire d'arrêter cette lumière étrangère : on y parvient en plaçant contre les verres une petite bande verticale de papier dont le bord inférieur horizontal limite à volonté la largeur du faisceau lumineux incident.

On peut rendre ainsi complètement sombre une partie plus ou moins grande de la surface des verres et c'est ordinairement quand la ligne de séparation d'ombre et de lumière passe par leur centre que l'on voit apparaître les anneaux.

Résultats.

Le Tableau suivant, emprunté au remarquable travail que je viens d'analyser, vérifie complètement la loi des diamètres :

Inclinaison.............................. $17°37'$
Diamètre de la lentille... .... 38^m

Ordre de l'anneau.	Diamètre observé.	Diamètre calculé.
	mm	mm
Deuxième..................	9,40	9,56
Troisième..................	13,42	13,49
Quatrième...........	16,53	16,52
Cinquième..................	19,17	19,06
Sixième..................	21,37	21,33
Septième..................	23,51	23,36
Dixième..................	28,80	28,62
Quarante-troisième..........	61,53	61,82

Les diamètres ont été calculés par la formule

$$d^2 = 2\,(m - i)\,D\lambda \text{ séc}\, i \text{ (1)},$$

dans laquelle m est l'ordre de l'anneau obscur considéré en prenant la tache centrale pour le premier, D le diamètre de la lentille sphérique, λ la longueur d'onde de la lumière employée et i l'angle d'inclinaison.

Voici les diamètres observés sous des inclinaisons différentes avec une lentille de $13^m,29$ de rayon : les nombres sont relatifs au 4e anneau.

Inclinaison.	Diamètre observé.	Diamètre calculé.
° ′	mm	mm
7.55.............	9,715	9,619
37.36...	10,78	10,755
61.37.............	13,865	13,885
74.17.............	18,36	18,39
85.21.............	33,79	33,625

(1) En effet, $l = \dfrac{d^2}{D} = 2(m-1)\lambda \text{ séc}\, i$.

L'expérience ne peut guère être poursuivie au delà de 86° : ur 90°, d'après Newton, les diamètres seraient trois fois et mi plus grands que sous l'incidence normale.

Signalons, avant de finir cette Manipulation, une curieuse périence due à M. Stefan. Quand on observe l'espace inlore, au delà des derniers anneaux visibles en lumière inche, et qu'on recouvre la moitié de la pupille avec une la-ille de mica, on voit apparaître un nouveau système d'anaux qu'on désigne sous le nom d'anneaux supplémentaires Stefan. Ils sont produits par le nouveau retard que subisit, au passage du mica, les rayons interférents auxquels l'apreil a déjà communiqué une différence de marche.

D'après M. Bouty on peut encore produire les anneaux supmentaires avec la lumière qui a traversé un vase rempli de peur d'acide hypoazotique, ou une cuve contenant une soion faible de didyme dans l'eau ou de permanganate de pose dans l'huile d'olives.

LXXVIIIe MANIPULATION.

MESURE DES LONGUEURS D'ONDE PAR LES MIROIRS DE FRESNEL.

Théorie.

Le phénomène des interférences peut servir à calculer les ngueurs d'onde d'une radiation : supposons en effet que us produisions des franges en lumière homogène, à l'aide s miroirs, et soit l la distance de la $n^{\text{ième}}$ frange à la frange centle et φ l'angle sous lequel, de cette frange centrale, on voit s deux images du point lumineux fournies par les deux miirs; la longueur d'onde λ de la radiation est donnée par la lation

$$\lambda = \frac{2\,l\,\text{tang}\,\varphi}{n}.$$

l se mesure par le micromètre de Fresnel; quant à l'angle φ on l'évalue avec une grande précision en installant un théodolite en face des miroirs.

Description.

A l'aide d'un héliostat, on dirige horizontalement les rayons solaires, à travers une fente verticale, sur une lentille cylindrique biconvexe à très court foyer, dont l'axe est parallèle à la fente : la lentille réunit la lumière incidente en une ligne focale, qui constitue une source lumineuse de grande intensité; les rayons qui en émanent tombent sur les deux miroirs plans dont l'intersection doit être rigoureusement parallèle à la fente.

La *fig.* 133 représente les miroirs en coupe horizontale; ils sont tous deux montés sur la plate-forme verticale PQ. L'un d'eux, OX, est fixe de direction, mais il peut être déplacé parallèlement à lui-même par le jeu de la vis AB; le second O'M est mobile autour de l'axe O'. Trois vis calantes, dont deux se projettent en F, l'autre en G, règlent le parallélisme de la charnière O' avec le plan du premier miroir; une dernière vis H modifie l'inclinaison.

Tout l'appareil est monté sur le banc d'optique ou bien sur un pied massif de fonte.

Les rayons sont reçus sur une lentille très convergente, enchâssée dans l'écran d'un micromètre dont le pas est de $0^{mm},5$ et dont la tête est divisée en 50 parties. En avant de cette loupe est tendu un fil fin servant de repère. Cet instrument, qui se prête admirablement à l'étude des franges aériennes, est connu sous le nom de *micromètre de Fresnel* : il présente l'avantage de faire voir également bien le myope et le presbyte; mais on comprend sans autre explication qu'ils ne voient pas les mêmes franges.

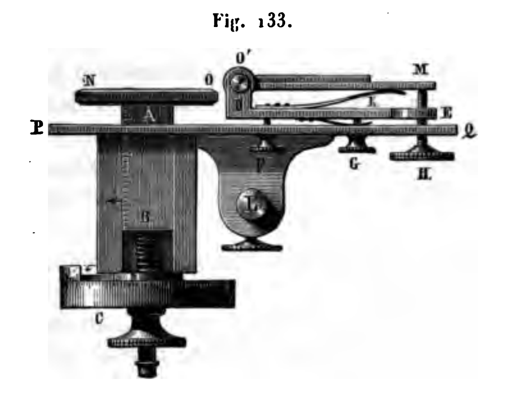
Pour opérer en lumière homogène, Fresnel appliquait un verre rouge contre la loupe; mais nous disposerons l'expérience d'une façon plus élégante en recevant la radiation solaire sur un prisme installé en avant de la fente. On peut ainsi faire passer sur les miroirs, les unes après les autres, les di-

verses radiations étalées dans le spectre et mesurer successivement leurs longueurs d'onde.

Le théodolite remplace le micromètre dans la seconde partie de l'expérience : il faut et il suffit que l'axe de cet instrument coïncide parfaitement avec la position de la frange centrale précédemment observée.

Fresnel évitait l'emploi du théodolite en perçant un trou fort petit dans un écran métallique, qu'il disposait dans la

Fig. 133.



région commune aux deux faisceaux interférents ; en réglant les distances, on peut projeter ainsi, sur un deuxième écran parallèle au premier, deux points lumineux dont il suffit de mesurer l'écartement pour en déduire, en fonction de la distance des deux écrans, la valeur de l'angle φ. Mais ce procédé est moins sûr que le précédent.

Notons incidemment que, pour obtenir des franges en projection, on emploie une lentille formée par l'assemblage de deux surfaces cylindriques opposées, dont les rayons de courbure sont inégaux et les axes rectangulaires : les franges sont parallèles à l'axe de la demi-lentille la plus énergique et elles sont très vives, car elles sont confinées dans un espace restreint en tous sens ([1]).

([1]) Billet. *Traité d'Optique physique*, I, p. 41.

Manuel opératoire.

1° Le réglage des miroirs est difficile : il faut nécessairement qu'ils se raccordent exactement suivant les deux lignes qui terminent leurs surfaces, pour que la frange centrale soit au milieu du champ de la loupe. Une saillie de $0^{mm},01$ la déplace sensiblement; de plus, l'intersection des deux plans doit être rigoureusement parallèle à la fente et à l'axe de la lentille, sinon le phénomène perdrait sa netteté. On opère dans l'obscurité.

Cette opération est extrêmement laborieuse pour les commençants; je leur conseillerai de s'assurer d'abord de la position relative des deux miroirs en cherchant l'image d'une ligne horizontale très éloignée. Après avoir mis les deux miroirs dans un même plan, ils leur donneront une très légère inclinaison.

Les raies sont d'autant plus larges que l'angle des deux miroirs est plus petit.

2° Les franges étant devenues visibles, on note celle qui est la plus lumineuse, la plus vive, la plus nettement dessinée, et par rapport à laquelle toutes les intensités sont symétriques; c'est la frange centrale, située à égale distance des deux foyers virtuels produits par le dédoublement de la fente. Amenant le fil vertical au milieu de cette raie brillante, on déplace le micromètre jusqu'à ce que ce repère se trouve au milieu de la $n^{ième}$ frange, la vingtième par exemple, et on divise l'espace parcouru par n. On peut atteindre une approximation allant au $\frac{1}{100}$ de millimètre.

La loupe fonctionne comme oculaire d'une lunette astronomique, dont l'objectif serait là où sont les deux images des miroirs; il en résulte que l'œil ne doit pas être contre le verre, mais un peu en arrière. Fresnel donnait la règle suivante : « Visez, disait-il, aux points lumineux, de manière que, le foyer des rayons réunis par la loupe tombant au milieu de la prunelle, toute la surface du verre semble illuminée, et allez alors chercher les franges, en conservant la même position relative de l'œil et de la loupe. » On trouvera la justification de cette règle dans l'excellent Traité de Billet, t. I, p. 360.

3° Le théodolite est ensuite substitué au micromètre; la ınge centrale ayant occupé le centre du champ de la ıpe, il est facile de placer en ce même point le centre ı cercle répétiteur. La lunette est dirigée horizontalement; ı vise tour à tour les deux foyers de lumière et l'on détermine ısi l'angle φ.

Résultats.

Fresnel s'est contenté de mesurer directement, par cette éthode, la longueur d'onde des rayons rouges, sensiblement ɔmogènes, que laisse passer un verre coloré par le protoxyde ɜ cuivre; il en déduisit les autres longueurs d'onde, en se ɛrvant des nombres trouvés par Newton dans ses observa-ons des anneaux colorés.

La longueur d'onde du rouge fut trouvée égale à 620 mil-onièmes de millimètre.

Nous avons déjà donné, dans la LXXIe *Manipulation,* les ɔngueurs exactes des ondes correspondant aux diverses raies u spectre solaire; le lecteur les trouvera à la page 343.

LXXIXe MANIPULATION.

MESURE DES LONGUEURS D'ONDE PAR LES RÉSEAUX.

Théorie.

La mesure des longueurs d'onde se fait avec beaucoup plus précision, au moyen des réseaux, qu'à l'aide des phéno-ènes d'interférence, car les raies des spectres constituent des pères très nets, auxquels on peut rapporter les observations. Quand l'onde incidente est plane et qu'elle coïncide avec la rface du réseau, on peut écrire

$$\lambda = \frac{\sin\delta}{nN},$$

δ étant la direction sous laquelle on voit une des raies d'un spectre de rang n, et N le nombre de traits contenus dans 1^{mm}.

Quand le plan du réseau est incliné d'un angle i sur celui de l'onde, la direction du $n^{ième}$ spectre est donnée par la formule

$$\sin i - \sin(i - \delta) = nN\lambda;$$

on tire de là

$$\lambda = \frac{2}{nN} \sin\frac{\delta}{2} \cos\left(i - \frac{\delta}{2}\right).$$

La déviation sera minimum lorsqu'on aura

$$i = \frac{\delta}{2};$$

si donc on place le réseau dans la direction qui correspond au minimum de déviation, la longueur d'onde sera donnée par la formule

$$\lambda = \frac{2}{nN} \sin\frac{\delta}{2}.$$

Il y a tout avantage à faire l'observation de la sorte; car, d'une part, la netteté des raies est considérablement augmentée, d'autre part, on n'a pas le souci de placer le réseau normalement à la direction du faisceau incident.

Cette méthode a été appliquée avec un grand succès par M. Mascart (¹); nous la suivrons dans cette manipulation.

Description.

Le réseau est installé sur la plate-forme d'un goniomètre de Babinet, entre le collimateur et la lunette. On mesure δ par le cercle répétiteur; M. Mascart évaluait les angles à $5'$ près.

Pour dédoubler la raie D du sodium dans le premier spectre, il faut un réseau d'au moins 40 traits par millimètre, d'après lord Rayleigh; 20 traits suffisent pour le second spectre et 14 pour le troisième. Mais les spectres sont d'au-

(¹) *Annales de l'École Normale supérieure*, I; *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, LVI, p. 138, et LVIII, p. 1111.

ant plus brillants et plus purs, que le nombre des traits est plus considérable; Nobert, de Barth, et Brunner ont réussi à en tracer plus de 1000 par millimètre.

La qualité essentielle d'un réseau est de ne point présenter d'irrégularités systématiques; on doit rechercher aussi une grande ouverture et contrôler rigoureusement le parallélisme des faces de la lame de verre.

On emploie généralement le Soleil comme source de lumière; la flamme de l'alcool salé convient peut-être mieux pour l'observation des raies D_1 et D_2, et elle peut servir à déterminer la valeur intrinsèque d'un réseau donné.

Le nombre N de traits par millimètre doit toujours être marqué par le constructeur sur le réseau.

Manuel opératoire.

1° La lunette est mise au zéro, le fil du réticule divisant en deux l'image de la fente vue directement.

2° Le réseau est ensuite fixé sur la plate-forme, les traits parallèles à la fente du collimateur; puis on cherche sous quelle incidence la lumière doit le rencontrer, pour que la déviation d'une raie déterminée soit minimum.

3° La lunette est mise au point pour les raies D du premier spectre; il est à remarquer qu'elle est dès lors au point pour toutes les raies de ce spectre.

4° On vise les raies dont on cherche la longueur d'onde et l'on note les angles avec le plus grand soin.

La même opération est répétée à gauche, et l'on prend les moyennes des angles ainsi déterminés.

Il pourrait sembler au lecteur que la mise au zéro soit inutile; elle n'a d'autre but que de s'assurer que le réseau est à la déviation minimum, car les angles doivent être égaux, à quelques secondes près, à droite et à gauche.

Résultats.

La méthode décrite ci-dessus présente la plus grande analogie avec celle qui nous a donné les indices de réfraction.

Elle permet de mesurer les λ avec une précision remarquable.

Nous avons déjà indiqué les longueurs d'onde correspondant aux diverses raies du spectre ; ces valeurs peuvent être considérées comme rigoureusement déterminées aujourd'hui. Voici, en effet, les valeurs moyennes des deux raies D, d'après les meilleurs observateurs, en millionièmes de millimètre :

Fraunhofer	588,8
Van der Willingen	589,5
Ditscheiner	590,3
Ångström	589,3
Stefan	589,3
Esselbach	589,1
Mascart	589,43

En opérant avec quatre réseaux différents, M. Mascart a trouvé les nombres suivants :

589,43
589,41
589,42
589,38

Il est peu de méthodes, en Physique, susceptibles d'une semblable rigueur.

Nous ferons observer aux élèves que la raie A ne se voit point dans les spectres des réseaux, et que les raies B et H sont d'une observation difficile.

Signalons enfin à leur attention une propriété remarquable des réseaux ; ils fournissent un spectre normal, dans lequel la séparation des radiations ne dépend absolument que de leur longueur d'onde.

LXXXe MANIPULATION.

MESURE DES LONGUEURS D'ONDE PAR LES ANNEAUX, A L'AIDE DE L'APPAREIL DE M. DESAINS.

Théorie.

Lorsqu'une lentille convexe repose sur un plan, il apparaît une tache noire au centre des anneaux formés par réflexion : sa position correspond exactement au point de contact. Or, quand on écarte lentement les verres, il semble que les anneaux se resserrent et disparaissent par le centre ; en même temps, la tache devient alternativement blanche et noire. Ces apparences sont faciles à reproduire en diminuant la pression exercée sur la lentille.

Pour ramener n fois le centre à redevenir noir, il faut, en partant de la position qui répond au contact, soulever la lentille de $n\frac{\lambda}{2}$, λ étant la longueur d'onde de la lumière homogène employée. Il en résulte un moyen de mesurer λ, par la détermination rigoureuse du déplacement e de la lentille, car on peut écrire

$$e = n\frac{\lambda}{2}.$$

Description.

M. Desains a réalisé cette expérience, à l'aide d'un appareil qui permet d'évaluer le $\frac{1}{100000}$ de millimètre [1].

Il se compose d'un plan de verre e' (*fig.* 134), mobile sous l'action d'une vis micrométrique, dont le pas est de $\frac{1}{2}$ millimètre. La lentille c est fixe ; trois vis de rappel, dont une

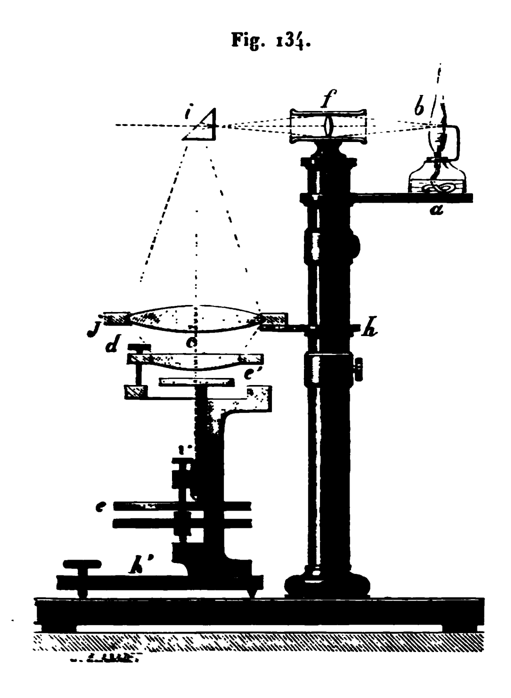
---

[1] *Journal de Physique*, III, p. 105 ; 1874.

seule *d* est visible sur le dessin, permettent d'en régler la position, de manière que son axe optique soit perpendiculaire au disque plan mobile et passe par son centre. Cette lentille est enchâssée dans un anneau de cuivre solide, qui est fixé sur le côté par l'intermédiaire d'une patte perpendiculaire à son plan.

La vis motrice peut être conduite directement à la main,

Fig. 134.



mais on peut encore agir sur elle par une vis tangente V, micrométrique elle-même. Grâce à cet artifice, on parvient à fractionner, en 50 parties égales, un déplacement du verre mobile égal à peu près à un demi-millième de millimètre.

En éclairant le système des deux verres avec une lumière monochromatique, on voit se développer autour du point de contact une série d'anneaux, qui couvrent toute la surface de la lentille; quand on fait tourner la vis, on est témoin du phénomène que j'ai décrit ci-dessus, et il est très facile de

mpter le nombre d'anneaux qui viennent se fondre l'un rès l'autre dans la tache centrale.

M. Laurent, à qui M. Desains a confié la construction de ce l instrument, se sert d'un dispositif spécial pour illuminer surface des verres : l'éclaireur qu'il emploie se compose un prisme *i*, à réflexion totale, qui renvoie sur la lentille *j* la mière émise par la flamme *b* d'une lampe à alcool salé ; les yons sont concentrés sur le prisme par une petite lentille *f*. n mettant l'œil derrière le prisme *i* et en regardant de haut n bas, on voit le champ inondé d'une lumière jaune égale- ent répartie.

RÉGLAGE DE L'APPAREIL.

1° *Réglage de l'éclaireur*. — La lampe à alcool étant allu- ée, on monte ou l'on descend le support *a*, et on le tourne, manière que l'image de la flamme jaune *b* se projette nette- ent en avant de la face du prisme, sur une carte de visite que n tient à la main. Puis, on cherche la position qu'il faut nner à la lentille *j*, pour illuminer le champ : une glace ant placée en *h* (nous supposons l'appareil de M. Desains omentanément enlevé), on doit la voir entièrement éclairée ; ur y arriver, on dispose des deux mouvements du prisme et l'orientation de la lentille.

2° *Réglage de l'appareil à anneaux*. — Le premier soin de pérateur sera d'amener le plan au contact de la lentille ; il réussira en tournant à la main la tête de la vis micromé- ique *e*. Il se forme aussitôt des anneaux dont le centre noir occupe pas généralement le milieu du verre : on les ramène ns l'axe en agissant sur les deux vis *d*. Il faut quelquefois n long tâtonnement pour y réussir : souvent on est conduit ns cette recherche à déterminer une pression considérable ntre les verres et à déformer leur surface, ce qui est un danger our l'instrument : nous attirons instamment l'attention sur ce oint.

Le centrage étant à peu près effectué, on glisse l'appareil ans l'éclaireur et l'on achève le réglage : les vis calantes du lateau *h* peuvent faciliter l'opération. L'expérience n'est rête qu'au moment où les anneaux, visibles jusqu'à la circon-

férence de la lentille, ne subissent aucun déplacement latéral par le fait de la rotation de la vis V. Il ne faut pas se dissimuler que ce résultat n'est jamais atteint du premier coup.

La rigueur des mesures dépend de la précision métrique et de la régularité du pas de la vis : ces qualités sont essentielles, mais elles ne se révèlent qu'à l'usage; les longueurs d'onde observées doivent être les mêmes, quelle que soit la position de la vis utilisée. Déterminant donc vingt fois de suite, par exemple, l'angle dont il faut tourner la vis pour faire disparaître 60 anneaux, on devra trouver des valeurs très voisines : l'appareil de M. Desains exigeait une rotation de 12°,88 pour produire cet effet en lumière jaune, et la différence ne dépassait pas 0°,06 d'un bout de la vis à l'autre; la valeur de l'angle calculé était de 12°,74.

Manuel opératoire.

1° L'appareil étant installé et éclairé, on fait disparaître 250 anneaux, en notant avec soin, au dixième de degré, la position initiale et finale de la tête de la vis micrométrique.

2° Soit α l'angle dont la vis a tourné; on en déduit λ par la formule

$$\frac{\alpha}{360}\,\frac{1}{2} = 250\,\frac{\lambda}{2};$$

d'où

$$\lambda = \frac{\alpha}{90000}.$$

Résultats.

Pour faire apprécier les avantages de la méthode de M. Desains, je me contenterai de dire que des élèves soigneux déterminent les longueurs d'onde à quelques millionièmes de millimètre près ([1]).

([1]) M. Desains a publié, en 1877, les valeurs de λ trouvées par ses élèves pour les deux raies D ; ces nombres ne diffèrent de ceux de M. Mascart que de 0,6 millionième de millimètre. Cf. *Rapport sur l'École pratique des Hautes-Études*, p. 10.

On peut les faire opérer sur des radiations simples prélevées dans le spectre de la lampe Drummond; mais il leur sera plus facile de ramener la lumière éclairante à l'homogénéité par absorption que par réfraction. Le rouge d'aniline et le sulfate de cuivre ammoniacal conviennent bien à cette expérience.

L'appareil de M. Desains permet de reproduire la célèbre expérience par laquelle MM. Fizeau et Foucault ont étudié les interférences avec de grandes différences de marche. Brewster avait démontré que la lumière émise par l'alcool salé est dichromatique : son spectre montre, en effet, deux raies D_1 et D_2 qui ne diffèrent que d'un angle de 16″ à travers un prisme de 60°. Ces rayons jaunes, de réfrangibilité différente, déterminent chacun leur système de franges ou d'anneaux; confondus d'abord pour une faible différence de marche ils se séparent bientôt et un moment arrive où les anneaux obscurs de l'une des lumières coïncident avec les anneaux brillants de l'autre; le phénomène est alors à peine visible. C'est lorsque la différence de marche δ répond à l'équation

$$\delta = 2p\frac{\lambda}{2} = (2p+1)\frac{\lambda'}{2},$$

λ et λ' étant les deux longueurs d'onde.

Le fait se présente la première fois pour $p = 500$. Lorsque ce nombre d'anneaux a disparu par le centre, on constate que le phénomène a perdu beaucoup de sa netteté, si même il ne s'est pas complètement effacé. Mais les anneaux reparaissent quand on atteint le nombre 1000 et disparaissent de nouveau à 1500. M. Fizeau a pu compter jusqu'à 50 réapparitions, alors que l'épaisseur d'air était plus grande que 15^mm.

LXXXIe MANIPULATION.

MESURE DE L'INDICE DES LAMES MINCES PAR LE RÉFRACTOMÈTRE INTERFÉRENTIEL DE M. JAMIN.

Théorie.

Quand deux faisceaux, issus d'une même source lumineuse, se superposent à une grande distance de leur origine, ils font naître, au lieu de leur réunion, des franges d'interférence.

Si l'on interpose dans l'un des faisceaux une lame d'épaisseur e et d'indice n, il se produit une différence de marche qui est immédiatement accusée par un déplacement des franges : les franges reculant de N rangs, la différence de marche $N\lambda$ est égale à $(en - e)$; d'où

$$e(n - i) = N\lambda.$$

Ce procédé a été appliqué par Fresnel et Arago, dès 1818, à la comparaison des indices des gaz : l'appareil dont ils se servaient est le type des réfractomètres interférentiels.

M. Jamin [1] a heureusement perfectionné la méthode primitive en opérant dans la lumière non limitée, entre deux lames de verre épaisses à faces parallèles; il se forme ainsi un système de franges horizontales dont on mesure le déplacement à l'aide d'un compensateur gradué empiriquement.

Description.

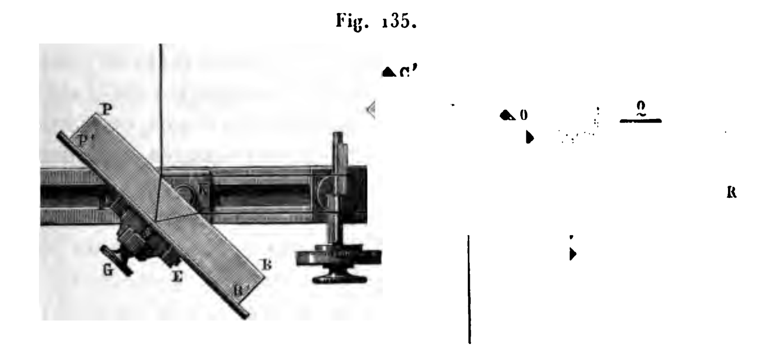
Le réfractomètre interférentiel de M. Jamin se compose de deux glaces verticales, très épaisses, étamées sur leur face pos-

---

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, III, p. 163 et 171; 1858. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, XLII, p. 1191, et XLV, p. 892.

érieure. La première PB (*fig.* 135) est fixe; elle reçoit la umière venue d'une source large, telle qu'une lampe, et la lécompose en deux faisceaux dont l'un se réfléchit sur la face ntérieure, tandis que l'autre pénètre dans le verre et se réléchit à sa surface postérieure. La seconde glace CD est paallèle à la première et parallèle à sa direction; mais elle peut ourner autour d'un axe horizontal MN par le jeu d'une vis O; e plus elle est mobile autour d'un axe vertical L sous l'action 'une vis Q qui agit sur l'alidade R. Les deux rayons éprouent sur cette glace des réflexions inverses de celles qu'ils

Fig. 135.



aient subies d'abord : on les reçoit sur une lentille à réticule i n'est point figurée sur le dessin, et on les observe à trars une ouverture très fine placée au foyer.

Les franges sont horizontales; elles se déplacent, de haut en s ou de bas en haut, quand on fait jouer la vis Q; elles sont utant plus étendues que l'axe de rotation s'approche plus ètre vertical, et elles s'élargissent ou se rétrécissent quand agit sur la vis G.

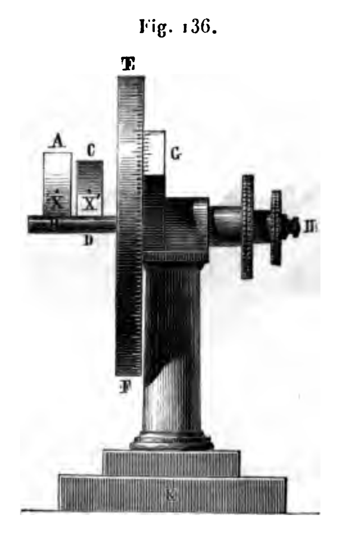
Le compensateur est disposé sur le banc entre les deux aces : il se compose de deux lames AB et CD (*fig.* 136), iées par une arête commune sur l'axe d'un goniomètre de Vollaston; on les incline lentement au moyen de la vis de appel de cet instrument. En outre de ce mouvement comun, elles peuvent encore recevoir un déplacement relatif par a vis *m* de moindre diamètre : la sensibilité du compensateur est d'autant plus grande que l'angle des deux lames X et X'

est plus petit. Cet appareil retarde inégalement les deux rayons et déplace les franges, proportionnellement à l'angle dont on fait tourner l'ensemble des lames.

Le banc permet encore d'installer sur le chemin des rayons interférents une auge double, destinée à recevoir les liquides dont on voudrait comparer les indices de réfraction.

Graduation du compensateur. — On pourrait calculer la formule qui exprime le retard apporté par les lames dans la marche des deux rayons : mais il est bien préférable de recourir à l'expérience.

Fig. 136.



Le compensateur étant installé à la portée de la main de l'observateur, on règle les vis Q et O et l'on écarte les lames, de manière à avoir des franges très nettes et suffisamment larges : ces deux conditions paraissent s'exclure l'une l'autre, mais il y a un juste milieu auquel correspond le maximum de précision de la méthode. Puis on amène la frange centrale sur le fil vertical du réticule. Pour déterminer avec certitude la position de cette frange, on opérera d'abord avec la lumière blanche, mais on devra y substituer une lumière homogène quelconque pour la graduation; la position de la frange centrale n'en sera point modifiée. La position initiale du goniomètre est notée avec soin.

2° On fait tourner le système des deux lames jusqu'à obtenir un déplacement égal à quatre franges : on en déduit l'angle qui correspond à un déplacement d'une frange.

Le compensateur est dès lors gradué en fonction d'une longueur d'onde λ; l'angle des deux lames ne devra plus être changé.

Manuel opératoire.

1° La frange centrale est amenée sur le fil du réticule.

2° Le milieu réfringent étant interposé, les franges se déplacent : on les ramène à leur position initiale en faisant agir le compensateur et, de sa rotation, on déduit le nombre de franges correspondant N.

Cette opération se fait en lumière blanche.

Résultats.

On détermine ainsi l'indice de réfraction d'une lame mince ou d'un liquide.

D'après M. Jamin, l'indice de l'eau à t degrés est donné par la formule

$$n = n_0 - 0{,}0000125 73\, t - 0{,}0000019297\, t^2.$$

Quand on veut opérer sur les gaz, on emploie des tubes de 3m de longueur; M. Jamin a démontré que l'indice de réfraction de l'air saturé de vapeur d'eau ne diffère de celui de l'air sec que de 0,000 000 720.

Un excellent exercice à proposer aux élèves est la vérification des lames quart d'onde et demi-onde dont nous aurons besoin dans les manipulations subséquentes.

L'expérience suivante présente encore un grand intérêt : une pointe chauffée étant placée verticalement sur le chemin d'un des rayons, on voit les franges prendre un mouvement ondulatoire qui témoigne du changement de densité de la couche d'air ambiante. Tout changement d'état physique se traduit du reste par une déformation caractéristique des franges, et M. Jamin a pu montrer comment une solution magnétique se concentre au pôle d'un aimant; un cristal qui se nourrit dans sa propre solution donne lieu au même phénomène.

CHAPITRE XVI.

POLARISATION.

LXXXII[e] MANIPULATION.

VÉRIFICATION DE LA LOI DE BREWSTER.

Théorie.

Brewster a démontré, en 1815, que la tangente de l'angle d'incidence, qui correspond à une polarisation complète, est égale à l'indice de réfraction.

Il en résulte que, pour l'incidence de la polarisation complète, le rayon réfracté est perpendiculaire au rayon réfléchi.

La loi de Brewster n'a pas de sens pour les cristaux biréfringents.

Description.

Seebeck employait, pour vérifier la loi de Brewster, un instrument spécial qu'on chercherait en vain dans les cabinets de Physique les mieux montés; mais nous atteindrons une approximation suffisante avec le goniomètre de Babinet.

La substance réfringente, taillée en lame ou en prisme, sera disposée sur la plate-forme de cet instrument, comme pour mesurer l'angle de réfringence ou l'indice de réfraction. On munira l'oculaire d'une bonne tourmaline, dont l'axe soit parallèle au plan du limbe. Enfin on éclairera la fente par une flamme monochromatique jaune.

Manuel opératoire.

1° On cherche d'abord, dans le champ de la lunette mobile, l'image réfléchie de la fente; pour faciliter l'observation, l'opérateur pourra enlever momentanément la tourmaline.

2° Déplaçant alors simultanément la plate-forme et la lunette d'un mouvement continu, il verra la lumière diminuer progressivement et s'éteindre même complètement, si la tourmaline est bonne.

3° Pour déterminer exactement le point de polarisation, il est prudent de le dépasser, de manière à faire reparaître la lumière, puis de revenir en arrière vers le point d'extinction complète.

En recommençant plusieurs fois cette recherche, on fait l'éducation du regard et l'on peut atteindre une grande précision, qu'on augmentera encore par un calcul de moyennes.

4° On lit sur le limbe l'angle que les deux lunettes font entre elles; l'angle de polarisation avec la normale en est la moitié.

Résultats.

	Angles de polarisation.	Indices.
	° ′	
Spath fluor blanc	55. 6,7	1,434
Opale commune	55.29,2	1,454
Crown	56.36	1,516
Blende d'Espagne	67. 8,2	2,371
Diamant	22.54	1,439
Eau	36.58	1,336
Huile	34.30	1,469

Il faut remarquer que, l'indice de réfraction n'étant pas le même pour toutes les radiations, la polarisation de la lumière blanche ne peut être complète pour les substances douées d'un grand pouvoir dispersif.

La loi de Brewster est souvent appliquée pour déterminer les indices de réfraction, quand on ne peut tailler la substance proposée sous forme de prisme ou de lame très mince;

ainsi nous verrons, par la suite, que l'indice du verre qui compose un miroir peut être correctement mesuré par l'angle de polarisation.

LXXXIII[e] MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA POLARISATION CHROMATIQUE ET APPLICATION A LA MESURE DE L'ÉPAISSEUR DES LAMES MINCES.

Théorie.

On observe les phénomènes de la polarisation chromatique dans la lumière parallèle, en interposant, entre deux nicols, une lame mince d'une substance appartenant à l'un des cinq derniers systèmes cristallins, taillée à faces parallèles, dans une direction autre que la direction perpendiculaire aux axes optiques. La lamelle cristalline observée se montre avec une teinte, dont la nuance et l'intensité dépendent de sa nature, de son épaisseur et de son orientation par rapport à ses axes cristallographiques.

Cette teinte change seulement d'intensité, lorsque les nicols restent fixes et qu'on fait tourner le cristal autour d'un axe parallèle à la direction des rayons lumineux qui traversent l'appareil.

Les sections principales des nicols étant parallèles, il y a maximum d'éclat quand l'un des axes de l'ellipse, suivant laquelle le plan de la lame mince coupe l'ellipsoïde d'élasticité, coïncide avec la direction commune des sections principales des nicols; il y a, au contraire, minimum quand les nicols sont croisés, et que la direction de l'un des axes de l'ellipse coïncide avec la section principale du polariseur ou de l'analyseur (¹).

Il en résulte que les directions des axes de l'ellipse de sec-

(¹) Je n'ai pas à définir ici l'ellipsoïde à trois axes dont Fresnel a introduit la considération dans l'Optique physique. Mais je crois devoir rappeler les

tion d'une lamelle cristalline sont celles dans lesquelles il faut placer les sections principales des deux nicols pour éteindre les couleurs.

Une rotation complète de la lame fait par conséquent coïncider quatre fois les axes avec les sections principales des nicols, et la lame paraît obscure dans quatre positions à angle droit.

Si l'on croise alternativement les nicols et qu'on les ramène au parallélisme, on constate que les phénomènes sont complémentaires dans les deux cas, pour ce qui est de l'intensité aussi bien que de la nuance. En tournant l'analyseur d'un mouvement continu, on voit donc les deux teintes complémentaires passer de l'une à l'autre par l'intermédiaire du blanc.

Ces diverses expériences permettent d'estimer facilement la direction des axes d'une lamelle biréfringente; elles conduisent encore à la mesure de l'épaisseur des lames collées sur verre, pour lesquelles le sphéromètre ne peut guère être employé.

Voici comment on opère dans ce dernier cas : les nicols étant à l'extinction, on observe une certaine teinte de la lame, le jaune clair par exemple; puis on en cherche l'équivalent dans l'échelle chromatique de Newton, et l'on note l'épaisseur correspondante de la lame d'air. Il suffit, pour connaître l'épaisseur, de multiplier le nombre ainsi déterminé par l'inverse de la différence des deux indices relatifs à la lumière jaune de la substance de la lame, soit par $\frac{1}{n' - n}$. Cette con-

relations qui existent entre les axes cristallographiques, optiques et d'élasticité dans les divers systèmes.

Dans les systèmes quadratique et rhomboédrique, l'axe de symétrie joue le rôle d'axe optique unique et l'ellipsoïde d'élasticité est de révolution autour de cet axe.

Les autres systèmes sont biaxes : leur ellipsoïde a trois axes inégaux. Dans le système orthorhombique, ces trois axes sont confondus avec les axes cristallographiques; les axes optiques sont normaux à deux cercles inscrits dans l'ellipsoïde passant par le centre et par l'axe moyen.

Le système monoclinique ne possède qu'un seul plan de symétrie, perpendiculaire à l'un des axes cristallographiques, lequel coïncide avec un des axes d'élasticité.

Quant au dernier système, il ne présente plus aucune coïncidence.

stante est pour le quartz 109, pour le mica 220 et pour le gypse 115, d'après Biot qui a le premier indiqué ce procédé (1).

La Table de Newton est malheureusement d'un usage peu commode, car les épaisseurs y sont estimées en millionièmes de pouce anglais; on préférera donc recourir à la Table métrique de Brücke, qui est du reste plus exacte (2). Les teintes indiquées correspondent à l'image extraordinaire obtenue avec des nicols croisés.

Couleurs.	Épaisseur en millionièmes de millimètre.	Couleurs.	Épaisseur en millionièmes de millimètre.
Noir	0	Indigo	589
Gris de fer	40	Bleu	664
Gris lavande	97	Bleu verdâtre	728
Gris bleu	158	Vert	747
Gris clair	218	Vert clair	826
Blanc verdâtre	234	Vert jaune	843
Blanc pur	259	Jaune verdâtre	866
Blanc jaunâtre	267	Jaune pur	910
Jaune paille	275	Orangé	948
Jaune paille	281	Orange rouge vif	998
Jaune clair	306	Rouge violet	1101
Jaune brillant	332	Teinte de passage	1128
Jaune orangé	430	Indigo	1151
Orangé rouge	505	Bleu vert	1258
Rouge chaud	536	Vert d'eau	1334
Rouge plus foncé	551	Rouge rose	1495
Pourpre	565	Gris violacé	1652
Violet	575		

Il semble, de prime abord, qu'on ne puisse reconnaître facilement les teintes qui figurent dans cette Table; mais deux épreuves très simples permettent de discerner sans peine les couleurs semblables, qu'on retrouve plusieurs fois répétées dans la série précédente. La première de ces épreuves consiste à incliner la lame; si on la fait tourner autour de son axe,

(1) J.-B. Biot, *Traité de Physique expérimentale et mathématique*, p. 77 et 348; 1816.

(2) Billet, *Traité d'Optique physique*, II, p. 490; 1858.

au fur et à mesure que l'inclinaison augmente par rapport aux rayons incidents, les teintes montent, c'est-à-dire correspondent à des anneaux d'un ordre plus élevé, comme si l'épaisseur augmentait; au contraire, si la lame tourne autour d'une droite perpendiculaire à l'axe, les teintes descendent à mesure que l'inclinaison augmente. On procède à la seconde épreuve en faisant traverser deux fois la lame aux rayons lumineux, comme si l'on doublait l'épaisseur; la teinte qui apparaît alors définit rigoureusement la première, grâce à l'échelle chromatique.

Ces deux essais sont nécessaires, quand il y a incertitude sur les couleurs; on ne saurait procéder autrement pour distinguer, par exemple, le premier violet du second.

Description.

M. de Norremberg a présenté au Congrès scientifique de Carlsruhe, en 1858, un instrument qui a été construit spécialement pour opérer en lumière convergente, mais dont on ne se sert plus guère qu'en lumière parallèle.

La glace A (*fig.* 137), qui fait avec la verticale un angle de 54°35″, polarise le rayon LA; celui-ci, s'étant réfléchi suivant AB′, subit une deuxième réflexion sur la glace B′, revient suivant BA′, traverse la lame cristalline placée en OC et rencontre enfin le nicol E, qui fait office d'analyseur. Remarquons que le rayon a été polarisé dans le plan d'incidence; une alidade et un vernier permettent de mesurer les angles que fait avec ce plan la section principale de l'analyseur.

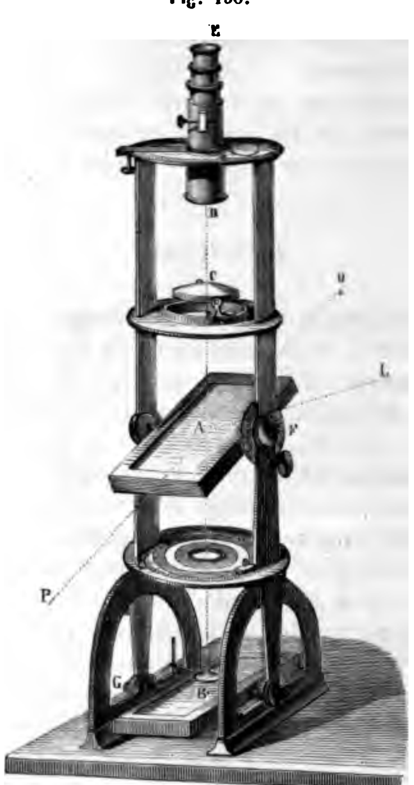
La lame à étudier se place généralement en C; mais on peut doubler la différence de marche des rayons interférents, en disposant la lame sur la plate-forme inférieure, entre les glaces A et B′.

Cet instrument se dispose le plus commodément devant une fenêtre; à l'aide d'un miroir auxiliaire, convenablement orienté, on envoie la lumière des nuées sur la glace A. L'illumination du champ de vision doit être bien uniforme, et il faut produire le maximum de polarisation.

Manuel opératoire.

I. Proposons-nous de déterminer la direction des axes d'une lame parallèle et d'évaluer son épaisseur par la méthode optique.

Fig. 130.



1° L'appareil est installé d'abord de manière à recueillir le plus de lumière possible; puis, on incline la glace à 54°; le nicol, mis à l'extinction, doit accuser une obscurité complète.

2° La lame étant placée en C, on la fait tourner dans son plan; les positions pour lesquelles l'image paraît éteinte cor-

respondent à la section principale et à une section perpendiculaire.

3° On observe avec soin la coloration que prend l'image et l'on cherche dans l'échelle chromatique de Brücke l'épaisseur d'air correspondante; il reste à la multiplier par la constante de la substance.

4° Plaçons l'un des axes déterminés précédemment à 45° du plan primitif de polarisation, et inclinons la lame autour de l'une d'elles; lorsque la rotation produit un retard dans la différence de marche des deux rayons, ce qui se reconnaît à ce que les couleurs remontent dans l'échelle, la section principale est perpendiculaire à l'axe de rotation.

II. Soleil a indiqué une méthode très simple qui permet de reconnaître si une lame est rigoureusement parallèle à l'axe. A cet effet, on amène la lentille B' dans le champ de l'instrument, de telle sorte qu'elle fasse converger le faisceau parallèle en son foyer qui doit se trouver sur la glace inférieure; la lame est couchée sur cette glace et on la recouvre d'une lamelle de mica quart d'onde, orientée de façon que sa section principale fasse un angle de 45° avec celle de la lame à essayer. Le mica, traversé deux fois par la radiation, fait tourner le plan de polarisation de 90°; l'onde qui était ordinaire devient donc extraordinaire, et réciproquement. Les deux ondes sont par conséquent polarisées à angle droit et ne présentent aucune différence de marche, chacune d'elles ayant parcouru des chemins identiques à l'état ordinaire et extraordinaire. Si la lame est rigoureusement parallèle, elle ne présentera donc point de trace de coloration dans l'analyseur. Au cas où le parallélisme n'existerait pas, on verrait apparaître des bandes colorées rectilignes, perpendiculaires à la section principale de la lame[1].

Résultats.

Ce n'est point en passant de nombreuses lames de mica au sphéromètre qu'on choisit les quarts d'onde, dont l'usage est si répandu en Optique, mais bien en étudiant leurs teintes à l'appareil de Norremberg; sur la plate-forme supérieure, ils

[1] VERDET, *Leçons d'Optique physique*, II, p. 157.

donnent un gris bleuâtre; sur la plate-forme inférieure, un jaune peu tranché. Le calcul leur assigne donc pour épaisseur

$$0{,}000\,158.220 = 0^{mm}{,}034.$$

On noie ces lames entre deux verres dans de la térébenthine, et on les installe dans un liége octogonal qui permette d'orienter sans peine leur section principale et de la faire tourner de 45° ou 90°. La direction des axes se détermine toujours sur le cristal épais duquel on tire par clivage la lame quart d'onde.

Le mica devrait être uniaxe et taillé parallèlement à cet axe; mais on est forcé d'admettre les biaxes, et alors la lame est taillée parallèlement à l'une des sections principales du cristal, et l'on admet que l'un des axes contenus dans cette section principale joue le rôle d'un axe unique.

L'appareil de Norremberg se prête aux plus curieuses expériences de la polarisation : rappelons pour mémoire les étoiles, fleurs, papillons, etc., de gypse qui donnent de magnifiques figures colorées, et les lames d'œil de poisson, de pointes d'oursin, de gomme copal, etc., sujettes à la double réfraction accidentelle.

On augmente le champ en ajoutant une lentille sur le cristal pour opérer dans la lumière divergente : les verres trempés, chauffés, ployés ou comprimés donnent alors les couleurs les plus vives.

Un disque concave de quartz produit des anneaux : en le combinant avec un quartz parallèle mince, on voit ces anneaux changer de couleur, et, si l'épaisseur est convenable, il se forme un anneau noir quand les sections principales sont croisées.

Un quartz ou un gypse parallèle prismatique fait voir des bandes colorées plus ou moins étalées.

Enfin, le compensateur de Babinet, formé de deux quartz prismatiques parallèles, égaux, renversés et croisés, montre des franges parallèles avec une raie noire au milieu.

L'influence de la direction, suivant laquelle la lame est taillée, peut aussi être étudiée par cet appareil; car, les teintes dépendent, toutes choses égales d'ailleurs, de la direction des faces de la lame.

S'il s'agit d'un cristal uniaxe, les teintes sont d'autant moins élevées que la lame se rapproche davantage d'être perpendiculaire à l'axe; dans une lame exactement perpendiculaire, les couleurs disparaissent entièrement.

Terminons cette manipulation par l'examen des ingénieuses combinaisons de mica obtenues par M. Reusch [1]. En superposant un groupement binaire de 12 lames de mica, d'épaisseur $\frac{\lambda}{4}$, croisées à 60°, le savant professeur obtient un résultat qui semble correspondre à la fois à la polarisation chromatique et à la polarisation rotatoire; l'analyseur étant à zéro, si l'on vient à tourner la lame dans son plan, les teintes changent d'intensité, et non de couleur; au contraire, quand on fait tourner l'analyseur, les couleurs se succèdent à peu près comme avec un quartz. Une pile, formée par le groupement trois par trois de 30 lames $\frac{\lambda}{7}$, reproduit exactement les effets de la polarisation rotatoire.

Soleil avait obtenu un résultat analogue en plaçant entre deux micas quart d'onde, parallèles ou croisés, une lame mince cristalline dont la section principale était à 45° de celles des micas : le gypse réussit fort bien, et, en lumière parallèle, le système se comporte comme un quartz. Un quartz perpendiculaire, enclavé de même entre deux micas croisés, perd au contraire son pouvoir rotatoire.

LXXXIVe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DE LA QUANTITÉ DE LUMIÈRE POLARISÉE QUI SE TROUVE DANS UN RAYON PARTIELLEMENT POLARISÉ.

Théorie.

Une pile de plusieurs glaces à faces parallèles dépolarise, par transmission, un rayon de lumière partiellement polarisé

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, XX, p. 207; 1870.

dans le plan d'incidence. Ce pouvoir dépolarisant varie avec l'inclinaison des lames sur le rayon incident, car le rapport entre le pouvoir réflecteur $\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}$ du verre pour la lumière polarisée dans le plan d'incidence, et son pouvoir réflecteur $\frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)}$ pour la lumière polarisée dans le plan perpendiculaire varie avec l'angle d'incidence.

Une pile graduée, dont le pouvoir dépolarisant est connu en fonction de son inclinaison, permet de déterminer la proportion de lumière polarisée qui se trouve dans un rayon donné. Il suffit, en effet, de chercher pour quel angle le faisceau redevient naturel après avoir traversé la pile.

Pour graduer une pile, on emploie une méthode expérimentale qui repose sur la loi de Malus.

Un rayon complètement polarisé est transmis à travers une lame mince de quartz parallèle à l'axe : lorsque l'axe de cette lame est contenu dans le plan de polarisation primitif, ce rayon passe tout entier à l'état ordinaire; mais, si l'axe de la lame et le plan de réflexion font un angle φ avec le plan de polarisation, il tombe sur la pile un ensemble de deux rayons polarisés à angle droit, l'un $\cos^2\varphi$, dans le plan de réflexion, l'autre $\sin^2\varphi$, perpendiculairement à ce plan, en prenant pour unité l'intensité totale du rayon transmis. Le rapport entre la lumière polarisée et la lumière totale, est donc égal à $\cos^2\varphi - \sin^2\varphi$, quand $\varphi < 45°$, et alors le rayon est polarisé partiellement dans la section principale; ou bien, ce rapport est égal à $\sin^2\varphi - \cos^2\varphi$, quand $\varphi > 45$, et alors le rayon est polarisé dans un plan perpendiculaire à la section principale. Nous bornant au premier cas, la lumière polarisée dans la section principale est égale à $\cos 2\varphi$.

Il suffit d'inscrire cette valeur en regard de l'incidence i pour obtenir une Table de graduation : on peut aussi construire une courbe.

Description.

Le polarimètre d'Arago se compose d'un tube de lunette à l'extrémité duquel est fixée une tige parallèle à son axe. Cette

tige soutient la pile de glaces : un limbe gradué en fait connaître l'inclinaison et par suite les angles d'incidence *i* qu'une alidade à vernier permet d'évaluer au $\frac{1}{6}$ de degré.

La bonnette qui porte l'oculaire contient une lame de quartz perpendiculaire, une lentille convergente et un rhomboèdre de spath.

Quand la lumière est polarisée, l'observateur voit deux images colorées de teintes complémentaires avec une partie commune blanche. En lumière dépolarisée, les deux images sont, au contraire, incolores.

Quelques repères permettent de déterminer la direction de la section principale du cristal de spath.

La pile de glaces doit être formée d'au moins dix lames, maintenues à une faible distance l'une de l'autre par des épaisseurs de carton ou de papier.

Arago avait appliqué son polarimètre à l'étude de la lumière du ciel; c'est ce qui explique la forme spéciale de l'instrument dont on trouve la description dans les Traités : il est monté sur un pied comme une lunette et il porte un limbe à niveau permettant d'évaluer les positions de l'axe par rapport à l'horizon. Ce même appareil fait office de cyanomètre.

Pour graduer la pile de glaces, il faut adjoindre à l'appareil un nicol et un quartz parallèle de 2^{mm}; le nicol sera monté dans une bonnette divisée en degrés pour la détermination des angles φ. Quand le polarimètre est monté sur un banc horizontal, comme cela peut se faire dans les laboratoires d'enseignement, on dispose aisément ces pièces en avant de la pile.

Manuel opératoire.

I. *Graduation de la pile :*

1° On reçoit un faisceau de lumière naturelle parallèle sur le nicol et le quartz auxiliaire. La section principale de ce quartz doit être dirigée verticalement dans un plan normal à la pile.

Quant au nicol, la section principale fera, par exemple, un angle φ avec celle de la lame cristallisée : cet angle doit être soigneusement déterminé et inscrit.

2° On incline la pile jusqu'à obtenir la dépolarisation, et on lit l'angle d'incidence i; cette observation sera répétée trois fois, en ayant soin de modifier entre chaque expérience et de rétablir la position dépolarisante de la pile.

3° Pour atténuer les erreurs qui proviennent de la sensibilité de la vue, il est prudent de tourner le rhomboèdre de l'oculaire de 90°, afin de voir les images dans une autre position relative; en recommençant trois fois la lecture comme précédemment, on obtiendra de nouvelles valeurs de i, qu'on devra confondre dans une même moyenne avec les premières.

4° On calcule $\cos 2\varphi$.

5° Faisant varier φ, on dresse une Table de ces valeurs en les disposant en regard des angles i.

On opère généralement sur de la lumière venant d'un ciel couvert, laquelle n'est point polarisée; quand l'instrument est horizontal, on peut prendre une source de lumière quelconque, mais il faut vérifier préalablement qu'elle ne présente pas de traces de polarisation.

Les angles i se comptent, comme d'habitude, à partir de la normale au plan de la pile.

II. *Détermination des quantités de lumière polarisée :*

1° La lumière à étudier est reçue directement sur la pile de glaces qu'on incline jusqu'à complète dépolarisation : on lit l'angle i correspondant.

2° En se reportant à la Table de graduation, on connaît aussitôt la quantité de lumière polarisée contenue dans le faisceau proposé.

Ces expériences sont à répéter un certain nombre de fois, afin d'éliminer par une moyenne les causes d'erreur.

Résultats.

Je trouve un excellent type de manipulation dans un travail publié par Ed. Desains, en 1851, sur la polarisation de la lumière réfléchie par le verre (1).

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, XXI, p. 286.

Mémoire, qui ne contient que 11 pages, est un modèle je recommande la lecture pour le fond et la forme.

savant physicien se proposait de vérifier les formules de ıel relatives à la réflexion vitreuse; l'intensité d'un ı naturel, réfléchi sous une incidence i, est égale d'après ́orie à

$$\frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}+\frac{\operatorname{tang}^2(i-r)}{\operatorname{tang}^2(i+r)}\right]$$

rapport entre la lumière polarisée et la lumière totale contient est

$$\frac{\cos^2(i-r)-\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)+\cos^2(i+r)}.$$

concordance entre les résultats observés et ceux qu'on ılait de la sorte fut trouvée parfaite.

ıici d'abord le Tableau de graduation du polarimètre :

Angle φ.		$\cos^2\varphi - \sin^2\varphi = \cos 2\varphi$.	Angle i.
°	°		° ′
20 ou	70	0,766	51.39
25	65	0,643	46. 2
30	60	0,500	40.18
35	55	0,342	43.32
40	50	0,174	44.26

ı lumière était réfléchie sur une glace de verre noir dont ice, obtenu par la loi de Brewster, devait être égal à 1,425, ıdu que l'angle de polarisation fut trouvé de 54°45′. Le d'incidence du rayon sur la pile était amené en coïnci- ːe avec le rayon réfléchi sur la glace noire.

I. Desains arriva aux résultats suivants :

Angles d'incidence I sur la glace.	Angles i.
°	° ′
30	36.52
35	42.31
40	48.58
70	48.33
75	41.52

ıut calcul fait, l'expérience et la théorie conduisent aux ̓res ci-contre :

Angles d'incidence I.	Proportions de lumière polarisée observées.	calculées.
30°	0,420	0,413
35	0,555	0,563
40	0,707	0,719
70	0,698	0,708
75	0,539	0,536

LXXXVe MANIPULATION.

ÉTUDE D'UN RAYON NATUREL, CIRCULAIRE, PARTIELLEMENT POLARISÉ OU ELLIPTIQUE.

Théorie.

On peut considérer les rayons circulaires et elliptiques comme le résultat de la superposition de deux rayons polarisés rectangulaires, issus d'un rayon polarisé primitif, présentant l'un sur l'autre un retard de $\frac{\lambda}{4}$. Quand ces rayons sont égaux, ils produisent un circulaire ; quand ils sont inégaux, ils engendrent un elliptique, dont la nature dépend du rapport de leurs amplitudes.

Les quarts d'onde sont donc des générateurs de rayons elliptiques ou circulaires.

Inversement, si l'on fait traverser un quart d'onde par un rayon déjà circulaire ou elliptique, on y introduira un nouveau retard égal à $\frac{\lambda}{2}$; le retard primitif des rayons constituants est par suite annulé ou élevé à $\frac{\lambda}{2}$, et partant il y a reconstitution d'un rayon rectiligne.

Un quart d'onde agit donc différemment sur les divers rayons: un rayon naturel reste naturel; un rectiligne est rendu circu-

ire ou elliptique ; un circulaire est restauré ; enfin un ellip-
que peut être restauré aussi, quand certaines conditions d'o-
entation sont satisfaites.

Le quart d'onde est par conséquent un polariscope circu-
ire et elliptique.

On peut aussi l'employer pour analyser une vibration ellip-
que. En effet, recevons un rayon de ce genre sur un mica
uart d'onde et plaçons la section principale de cette lame
ans une direction telle que la polarisation rectiligne soit ré-
ablie : nous trouvons ainsi la direction pour laquelle les deux
rayons rectangulaires, dans lesquels l'ellipse se décompose, ont
une différence de marche égale à un quart d'ondulation ; or,
cette direction est celle des axes de l'ellipse. Mais nous con-
naissons aussi l'azimut de la polarisation rétablie ; la tan-
gente de cet angle exprime le rapport des longueurs des axes
de l'ellipse d'oscillation. Le signe de cette tangente dépend du
sens dans lequel la lumière est polarisée elliptiquement et de
la nature de la lame quart d'onde.

Verdet résume ces conditions de la manière suivante [1] :
les angles sont supposés comptés de droite à gauche pour l'ob-
servateur qui reçoit le rayon.

Section principale de la lame parallèle au grand axe de l'ellipse.		Tangente de l'angle du plan de polarisation avec la section principale de la lame quart d'onde.
Lame négative	Polarisation elliptique de droite à gauche.	$+\frac{b}{a}$
	Polarisation elliptique de gauche à droite.	$-\frac{b}{a}$
Lame positive	Polarisation elliptique de droite à gauche.	$-\frac{b}{a}$
	Polarisation elliptique de gauche à droite.	$+\frac{b}{a}$

---

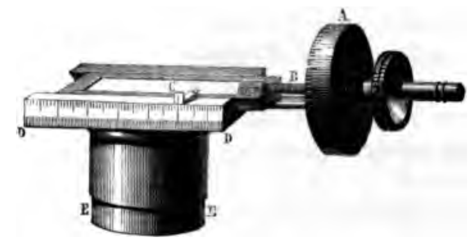
(1) VERDET, *Leçons d'Optique physique*, II, p. 75.

Description.

Le quart d'onde le plus généralement employé est le mica : nous l'avons déjà décrit. L'épaisseur de $0^{mm},032$ est celle qui correspond à un retard de $\frac{\lambda}{4}$ du rayon ordinaire sur le rayon extraordinaire en lumière jaune.

Soleil a construit des quarts d'onde de large section, en accolant deux prismes aigus de quartz et les recouvrant d'une lame parallèle, en duplication croisée; dans les prismes, l'axe est parallèle à l'arête réfringente, tandis qu'il est perpendiculaire à cette direction dans la lame.

Fig. 138.



Le parallélépipède de Fresnel peut aussi jouer le rôle d'un quart d'onde, car un rayon incident polarisé dans un azimut de 45° y devient circulaire. Mais cet instrument déplace le faisceau; le prisme de Dove, dont la section est isoscèle, ne présente pas cet inconvénient. Je renvoie aux Traités théoriques pour ce qui est de ce dernier polariscope.

C'est le compensateur de Babinet, modifié par M. Jamin, qu'on emploie le plus généralement quand on veut étudier une vibration elliptique : les deux prismes droits égaux de quartz, dont il se compose, se présentent l'un à l'autre par leur face hypoténuse, mais sont orientés à angle droit par rapport à leurs axes. L'un d'eux est fixe sur la bonnette E (*fig.* 138), l'autre se déplace parallèlement à son axe par le jeu de la vis micrométrique BA, qui mesure son déplacement.

Cet appareil donne des franges colorées, même en lumière parallèle; un fil très fin placé dans la bonnette, parallèlement aux franges, permet de fixer leur position. On peut obtenir avec cet instrument n'importe quelle différence de marche; il peut donc remplacer en toute circonstance un quart d'onde.

Le bilame de Bravais, composé de deux quarts d'onde juxtaposés, dont les sections principales sont à angle droit, constitue encore un excellent polariscope elliptique de la plus grande sensibilité; car les teintes différentes qu'il présente permettent de reconnaître une très faible polarisation elliptique.

Tous ces polariscopes sont ajustés dans des anneaux pouvant tourner l'un dans l'autre.

Manuel opératoire.

I. *Reconnaître la nature d'un rayon :*

Un rayon naturel, qui rencontre sous l'incidence normale un cristal biréfringent, se divise en deux rayons, dont les intensités sont indépendantes de l'orientation du cristal. Il conserve cette propriété après son passage à travers une lame mince cristalline. Avec les polariscopes divers de Wollaston, d'Arago, de Babinet, de Savart, etc., il ne donne que des résultats négatifs.

Un rayon polarisé rectilignement se reconnaît sans peine à l'aide des nombreux polariscopes dont nous disposons; à tous les phénomènes d'extinction, de franges et de coloration bien connus viennent encore s'ajouter les houppes de Haidinger, qui, pour certains yeux, sont d'une grande délicatesse et marquent la direction du plan de polarisation par deux houppes jaunes.

Le compensateur de Babinet donne des franges très nettes en lumière polarisée; pour déterminer la position du plan de polarisation, il suffit de faire tourner l'analyseur jusqu'à ce que la frange centrale de l'image extraordinaire soit aussi noire que possible : la section principale de l'analyseur est alors parallèle au plan de polarisation.

Adjoignons au bilame de Bravais un analyseur, et faisons-

les tourner tous deux simultanément, de façon que la section principale de l'analyseur reste parallèle à la bissectrice des axes des deux moitiés de la lame; nous trouverons une position pour laquelle chacune des images de l'analyseur présentera une teinte uniforme; cette position est celle où la section principale de l'analyseur est parallèle au plan primitif de polarisation.

Les propriétés caractéristiques de la lumière polarisée circulairement sont les suivantes :

1° Elle donne deux images de même intensité dans un analyseur biréfringent, quelle que soit l'orientation de sa section principale.

2° En traversant un quart d'onde, elle se transforme en lumière rectiligne, ce qui permet de la distinguer de la lumière naturelle.

Il est facile de déterminer le sens de la polarisation, en cherchant quel angle forme le plan de polarisation du rayon émergent avec la section principale de la lame quart d'onde : la lame étant négative, la polarisation a lieu de droite à gauche, si cet angle est égal à $-45°$; elle a lieu de gauche à droite, si cet angle est égal à $+45°$. Nous comptons toujours les angles positivement de droite à gauche.

La lumière polarisée elliptiquement, reçue sur un analyseur biréfringent, donne deux images dont les intensités sont inégales, et qu'on ne peut faire disparaître complètement : avec le bilame, les teintes des deux plages sont toujours différentes. La première de ces propriétés pourrait faire confondre la lumière elliptique avec un faisceau partiellement polarisé, mais la seconde est caractéristique; de plus, nous savons que la lumière elliptiquement polarisée se transforme en lumière rectiligne en traversant un quart d'onde, dont la section principale est parallèle à l'un des axes de l'ellipse de vibration.

II. *Déterminer les constantes d'une vibration elliptique :*

Nous emploierons à cet effet le compensateur, qu'il est nécessaire de graduer préalablement.

On y reçoit, à cet effet, un faisceau de lumière polarisée rectilignement, à 45° de sa section principale, et l'on dirige le faisceau émergent sur un analyseur dont la section principale est parallèle au plan primitif de polarisation. On fait coïncider

le fil avec la frange noire centrale, dans l'image extraordinaire; puis, on agit sur la vis micrométrique jusqu'à ce que la première frange soit amenée sous le fil.

Le déplacement L correspond alors à une différence de marche égale à $\frac{\lambda}{2}$ et le compensateur est gradué : pour en faire un quart d'onde, il faudra mouvoir le prisme de $\frac{L}{2}$. Cette opération se fait assez difficilement en lumière blanche; les franges sont au contraire très nettes en lumière monochromatique rouge.

Supposons maintenant que le compensateur soit quart d'onde dans la partie qui est en regard du fil : employons-le à l'étude d'une vibration elliptique. Nous ferons tourner d'abord le compensateur jusqu'à ce que la frange noire déplacée revienne sous le fil : les axes de l'ellipse sont alors parallèles à ses sections principales.

Pour déterminer le rapport des axes, faisons tourner ensuite l'analyseur, sans toucher au compensateur, jusqu'à ce que la frange centrale prenne son obscurité maximum. La tangente de l'angle des sections principales du compensateur et de l'analyseur est alors égale au rapport des axes de la vibration elliptique, ainsi que nous l'avons vu ci-dessus.

LXXXVIe MANIPULATION.

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS OPTIQUES BIRÉFRINGENTES.

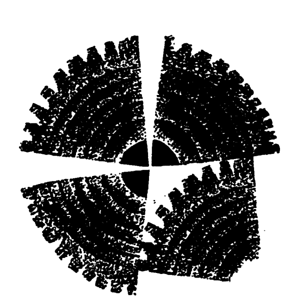
Théorie.

Rappelons d'abord les phénomènes que présente, entre deux nicols croisés, une lame à faces parallèles, taillée dans un cristal uniaxe, perpendiculairement à cet axe; on voit une série d'anneaux circulaires, concentriques (*fig.* 139), traversés par

une croix noire dont un des bras est parallèle au plan primitif de polarisation, et dont les bords sont diffus et les extrémités épanouies. Quand on tourne l'analyseur de 90°, les couleurs des anneaux sont remplacées par leurs complémentaires et la croix devient blanche.

Fig. 139.



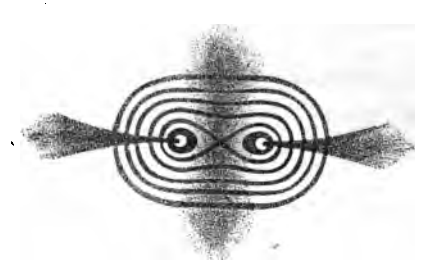


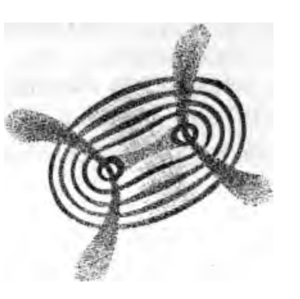
Si la plaque est oblique sur l'axe, les anneaux prennent une forme elliptique d'autant plus prononcée que l'obliquité est plus grande; en même temps, le centre de la croix se déplace, et celle-ci finit par disparaître complètement.

La dispersion des couleurs est sensible dans la plupart des uniaxes.

Lorsqu'on opère sur un cristal biaxe, normal à la ligne

Fig. 140.



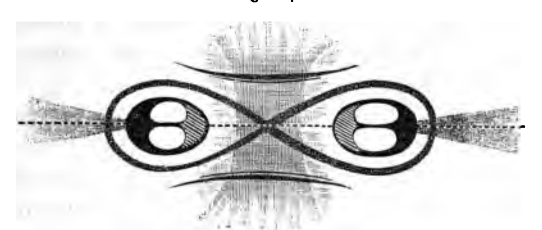


moyenne, et que l'angle des axes est suffisamment petit, on aperçoit (*fig.* 140) des anneaux ovales en forme de lemni-

scates, traversés par une double bande noire, quand le plan des deux axes est parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation primitif; cette sorte de croix se dédouble en deux branches hyperboliques, quand le plan des axes est à 45°. Les bandes noires deviennent blanches, lorsqu'on tourne l'analyseur de 90°.

Dans les cristaux du système rhombique, les axes optiques, correspondants à toutes les couleurs sont situés dans le même plan et possèdent la même bissectrice; tout est donc symétrique par rapport à cette ligne, et les courbes isochromatiques qui entourent les axes (*fig.* 141) sont absolument identiques ([1]).

Fig. 141.



Nous ne trouvons plus la même symétrie dans le système clinorhombique; là, en effet, les axes optiques des diverses couleurs n'ont plus nécessairement la même bissectrice. La position relative des bissectrices de leurs angles aigus donne lieu dès lors à trois espèces de dispersion, auxquelles M. Des Cloizeaux a appliqué les noms de dispersion *inclinée, horizontale et croisée* ([2]).

Voici comment on peut les définir.

Dans les cristaux clinorhombiques, la direction perpendiculaire au plan de symétrie est toujours un axe d'élasticité,

---

([1]) Il est extrêmement difficile de reproduire, même par la polychromie, les apparences si variées auxquelles donne lieu la dispersion des couleurs; mais il est possible d'indiquer en noir les caractères de symétrie présentés par les foyers des lemniscates. Dans nos figures, les parties les plus sombres correspondent aux couleurs les plus réfrangibles; le jaune ressort en clair, et le rouge est marqué par des hachures.

([2]) *Annales des Mines*, VI; 1864.

et les deux autres axes sont compris dans le plan de symétrie. Or, ce plan peut être parallèle à celui des axes optiques, et alors la dispersion est inclinée; ou bien, il lui est normal, et la dispersion est horizontale ou croisée. Elle est horizontale, lorsque la bissectrice aiguë est perpendiculaire à l'axe de symétrie; elle est inclinée, lorsque cette bissectrice lui est parallèle.

Ces définitions, très précises, demandent à être étudiées, mais elles deviennent facilement intelligibles, quand on a sous les yeux un prisme oblique à base rhombe, dans lequel les axes des couleurs rouge, jaune et bleue sont figurés par des fils; M. Ivan Werlein en a construit pour notre laboratoire de Lille des modèles très élégants, qui répondent aux trois dispersions: ils permettent de prévoir *a priori* les modifications spécifiques, introduites dans les anneaux par la position relative des axes.

Un cristal, dont la dispersion est inclinée, est reconnaissable par l'opposition qui se manifeste dans l'arrangement des couleurs des deux systèmes d'anneaux : l'un offrira, par exemple, du rouge à l'extérieur et du bleu à l'intérieur, ainsi qu'on le voit en I (*fig.* 142), tandis que l'autre montre le rouge à l'intérieur et le bleu à l'extérieur. Le gypse est le type de cette dispersion. Ces caractères perdent de leur netteté dans certains cristaux, mais on arrive presque toujours à constater une dissymétrie du genre de celle que nous avons indiquée sur le dessin, entre les deux systèmes de courbes se soudant pour former la lemniscate.

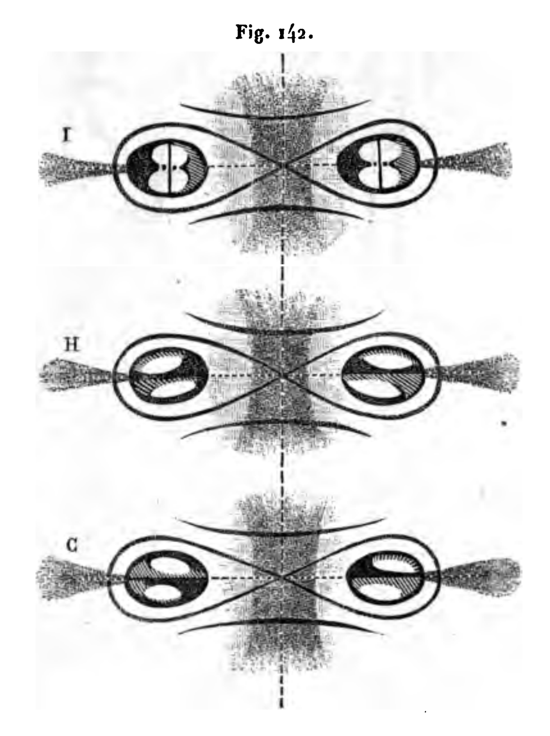
Pour une autre classe de cristaux, les couleurs des anneaux sont disposées symétriquement des deux côtés du plan des axes, comme on peut le constater en H; la dispersion est alors horizontale. Cette opposition est d'ordinaire plus éclatante, quand le plan des axes est à 45° du plan de polarisation. L'orthose du Saint-Gothard peut servir de type de ce genre.

Le point où la face que l'on observe est percée par la bissectrice aiguë peut enfin devenir un centre de symétrie pour les anneaux des différentes couleurs : c'est dans les bordures des hyperboles ou des barres qui traversent les anneaux que le phénomène est le mieux marqué; on l'observe nettement

dans le borax, sur lequel on peut s'exercer à reconnaître la dispersion croisée, figurée en C.

Les trois dispersions sont donc réunies dans la *fig.* 142 sous les rubriques I, H et C; le caractère de chacune d'elles ressort bien de cette comparaison synoptique.

Fig. 142.



Les cristaux du système anorthique offrent une dispersion beaucoup plus compliquée, qu'on peut observer dans l'axinite, l'albite ou l'amblygonite (dans l'huile), mais qu'il n'y a aucun intérêt à étudier au point de vue purement physique.

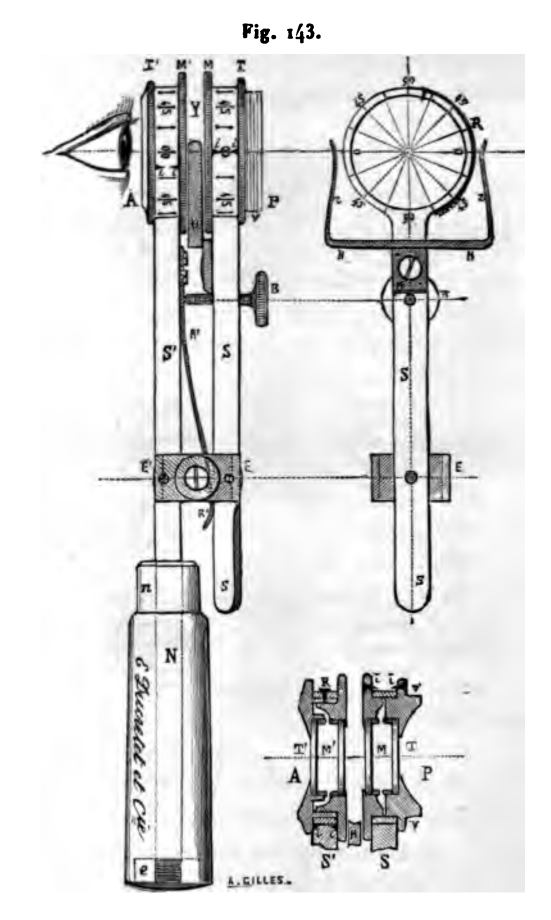
Description.

La pince à tourmalines est l'appareil polarisant le plus simple; M. Bertin l'a perfectionnée en y adjoignant des cercles divisés A et P, qui permettent de relever exactement

la position des axes (*fig.* 143); de plus, une lentille mobile dans une bonnette augmente le champ [1].

Le champ d'une pince ordinaire est très exigu, et il ne dé-

Fig. 143.



passe guère 16°; tout au plus, peut-on observer les anneaux du nitre et du plomb carbonaté; avec la pince Bertin, on voit encore les franges de la calamine, dont les axes sont éloignés de 79°.

---

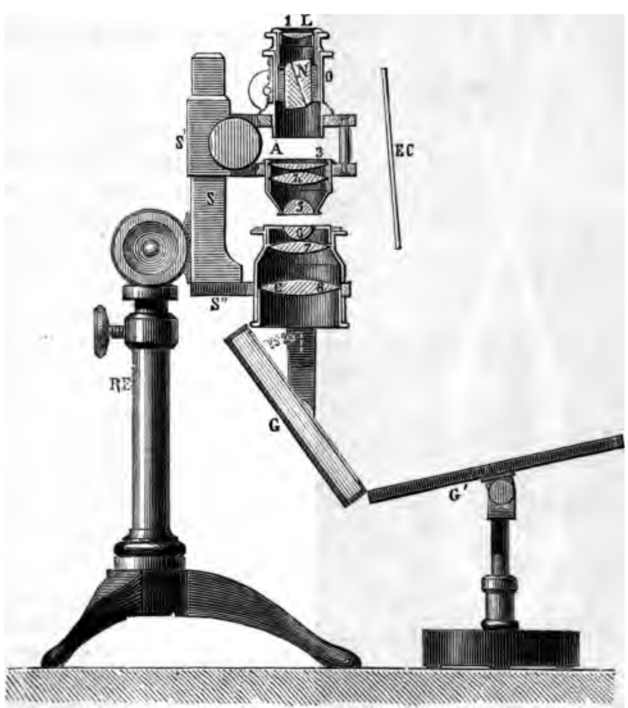
(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 5e série, XVIII (1879); *Journal de Physique*, X, p. 116; mars 1881. Nous devons à l'obligeance de MM. Ducretet et Cie les *fig.* 143 et 144.

Mais ce petit instrument, quelque ingénieux qu'il soit, ne peut remplacer le microscope polarisant.

De nombreux modèles ont été créés par les constructeurs, sur les types d'Amici et de M. de Norremberg. On y trouve toujours un polariseur, un focus, un microscope et un ana-

Fig. 144.





yseur; le champ de vision dépasse généralement 130°. Je me ontenterai de décrire le microscope de M. Nodot, qui est, me emble-t-il, le plus récent et sans doute le plus simple ([1]).

Dans cet instrument, une pile de glace G (*fig.* 144) de large urface, éclairée par un miroir mobile G', sert de polariseur; n nicol N de petite dimension, placé au-dessus de la lentille culaire, fait office d'analyseur.

([1]) *Journal de Physique*, VI, p. 230; 1877.

Le système oculaire est formé de trois lentilles marquées des chiffres 6, 7 et 8, dont la dernière est hémisphérique.

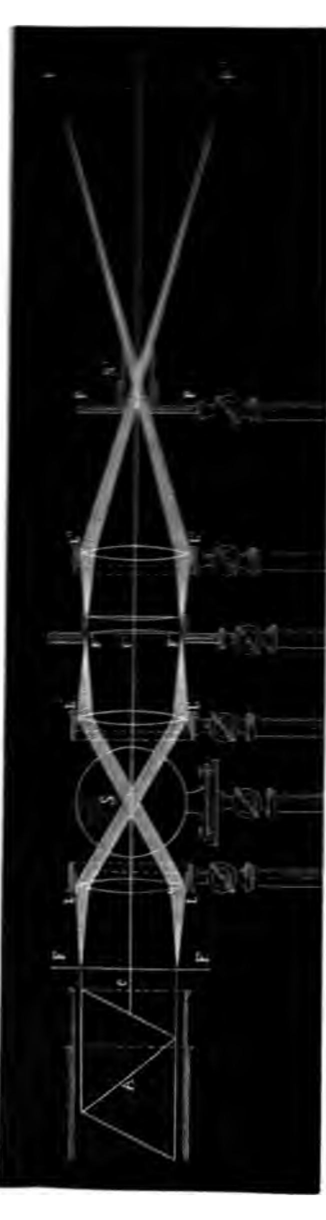


Fig. [illegible]

EC est un écran destiné à arrêter les rayons extérieurs. La mise au point s'opère à l'aide de la vis à crémaillère S.

Pour les expériences dans la lumière convergente, le cristal à observer se place entre les lentilles 5 et 6; pour les expériences dans la lumière parallèle, le constructeur a ménagé un intervalle en A entre le nicol et la lentille 3. C'est là qu'on dispose les lames quart d'onde, dont l'emploi est si fréquent dans les expériences que nous décrivons.

Le microscope de M. Nodot se prête fort bien aux projections, et il a même permis de photographier les franges [1].

---

[1] Nous croyons utile d'indiquer ici la disposition d'ensemble des lentilles nécessaires pour projeter sur un écran les expériences de polarisation.

Les microscopes polarisants ne présentent généralement pas les avantages de celui que nous venons de décrire et l'on se voit obligé de recourir au banc d'optique.

La lumière d'une source intense (soleil, lumière électrique, lampe de Drummond) est polarisée à travers un nicol A ou un prisme de Foucault (*fig.* 145), puis elle est reçue sur une lentille L très con-

Manuel opératoire.

Le maniement des appareils polarisants est très simple, et e n'ai rien à ajouter à ce qui précède; la mise au point se fait comme dans le microscope ordinaire.

Résultats.

I. *Substances monoréfringentes :*

Elles n'exercent aucune action sur la lumière parallèle ou convergente. Cependant certains cristaux, formés de couches de densités différentes, produisent les effets étudiés par Biot, sous le nom de *polarisation lamellaire;* tels sont les hyalites, l'analcime, l'alun, la boracite, le sel de Senarmont, etc. Le chlorate de soude fait tourner le plan de polarisation.

---

vergente dont le foyer se trouve en S. A la suite, on dispose une seconde lentille L', égale à la première, ayant son foyer au même point S; puis on installe sur le banc l'appareil de projection, composé des lentilles C' et L", qu'on met au point de manière que l'image du diaphragme soit bien nette sur l'écran F'''. La lame cristalline se place en F ou en F', quand on veut opérer en lumière parallèle, et en S, dans les cas où il faut de la lumière convergente.

M. Duboscq a construit un appareil spécialement destiné à la projection des phénomènes de polarisation : M. Bertin l'a décrit dans le *Journal de Physique,* t. IV, p. 72 et 111; 1875. En variant la disposition du jeu de lentilles, on peut reproduire toutes les expériences classiques.

Excellents pour la lumière parallèle et la lumière divergente, les appareils de projection laissent à désirer pour la lumière convergente et il faut reconnaître qu'ils sont bien inférieurs au microscope polarisant : on ne réussit pas à former de bonnes images pour les lames cristallines minces; de plus, ces appareils manquent de champ et ils ne permettent guère de projeter d'autres anneaux que ceux du nitre, du carbonate de plomb et de l'aragonite. Tous les autres biaxes ont les axes trop écartés. Le gypse, dont l'étude est pleine d'intérêt, exige un champ de 100° : M. Duboscq a réussi, il est vrai, à le projeter, mais au détriment de l'illumination des images.

Bref, quels que soient les progrès réalisés par les constructeurs, le microscope polarisant conserve une telle supériorité, que c'est toujours par l'observation individuelle qu'il faudra étudier les phénomènes de la polarisation : les projections seront réservées pour les cours publics.

II. *Systèmes quadratique et rhomboédrique :*

Ces cristaux sont uniaxes et ils donnent les anneaux du spath.

Lorsque la lame est parfaitement normale à l'axe et bien homogène, on n'observera aucune modification dans le phénomène en lui faisant décrire dans son plan une circonférence entière. Mais on trouvera des cristaux singuliers, tels que les spaths hémitropes, quelques béryls, certains cristaux d'idocrase, de zircon, de mellite, etc.

En plaçant un mica quart d'onde dans l'azimut 45°, entre deux quartz perpendiculaires de même épaisseur, on produit une hémitropie artificielle.

On observe les anneaux sans croix d'Airy en mettant de chaque côté du cristal deux micas quart d'onde croisés. Ces anneaux sont à centre noir, lorsque le nicol est à l'extinction : ils deviennent complémentaires, si l'on tourne de 90°, soit le nicol, soit l'un des micas (¹).

Les anneaux du quartz présentent une particularité intéressante : la croix noire ne va pas jusqu'au centre lorsque les plaques sont épaisses de 3^{mm}; le cinabre offre les mêmes anneaux pour une épaisseur de $0^{mm},19$. Ces anneaux s'agrandissent ou se contractent quand on fait tourner l'analyseur; ils se dilatent lorsque la rotation est de même sens que celle qui est propre au cristal.

On étudie la dispersion des couleurs en regardant les anneaux à travers un double verre de couleur formé de deux lames juxtaposées, l'une bleue et l'autre rouge, que l'on place sur l'oculaire ou bien en A. Pour déterminer le rang des anneaux de même diamètre, il faut amener la ligne de séparation des deux verres sur l'un des bras de la croix. Dans le spath, le troisième anneau rouge est la continuation du quatrième anneau bleu; l'apophyllite a une dispersion nulle.

M. Bertin a appelé l'attention des physiciens sur les anneaux de la glace dont les franges sont fort belles : les cristaux ont toujours leur axe perpendiculaire à la surface de l'eau dans laquelle ils se sont formés.

(¹) *Journal de Physique*, IV, p. 114; 1875.

III. *Système rhombique :*

Ces cristaux sont biréfringents à deux axes. Citons le péidot, l'andalousite, la staurotide, la thénardite, la cordiérite, e mica, la topaze, etc.

Le micromètre, dont l'oculaire est pourvu, permet de vériier si une plaque est bien normale à la bissectrice des axes : l faut que le sommet de la courbe qui traverse chaque sysème d'anneaux, quand le plan des axes est à 45° du plan de polarisation, occupe la même division à droite et à gauche du centre.

IV. *Système clinorhombique :*

Ces cristaux présentent une dispersion dont la déterminaion présente le plus grand intérêt.

Dispersion inclinée.	Dispersion horizontale.	Dispersion croisée
Gypse jusqu'à 80°.	Orthose.	Borax.
Diopside.	Sulfate de strychnine.	Heulandite.
Formiate de cuivre.	Sulfate de manganèse.	Gay-Lussite.
Euclase.		Sel de Glauber.
Épidote.		
Trémolite.		
Sphène.		
Datholite.		

Les macles ne sont pas rares dans ces cristaux : le système es lemniscates, au lieu d'être simple, peut devenir double et ıême triple.

En chauffant légèrement le gypse, on observe que l'hyperole de l'un des systèmes d'anneaux se rapproche beaucoup lus vite du centre que celle de l'autre système, ce qui prouve ue, si la lame a été taillée normalement à la bissectrice aiguë les axes jaunes, elle ne l'est plus rigoureusement dès que la empérature diffère de celle où elle a été taillée. Cette interrétation est due à M. Des Cloizeaux, à qui nous avons emrunté la plupart des résultats précédents.

V. *Système anorthique :*

Aucun fait intéressant ne ressort pour nous de la complicaon extrême du phénomène.

Le microscope polarisant se prête encore à de nombreuses

expériences, dont nous croyons devoir signaler les principales.

Le platinocyanure de potassium, la pennine, la biotite, l'alurgite, etc., et quelques autres cristaux dichroïques à un axe produisent des houppes dont M. Bertrand a donné la théorie (¹); la première de ces substances notamment montre, entre deux nicols croisés, une croix noire et des anneaux se détachant sur un fond rouge uniforme; mais, si l'on tourne l'analyseur de 90°, le champ se divise en quatre secteurs alternativement rouges et violacés.

L'andalousite, les cristaux colorés du genre épidote et, en général, les cristaux biaxes fortement dichroïques sont encore caractérisés par des houppes superposées le plus souvent à un système d'anneaux fort irrégulier. Ces houppes s'observent du reste aussi en lumière naturelle et il suffit, par exemple, de regarder le ciel blanc à travers une lame perpendiculaire d'andalousite pour voir deux secteurs sombres sur un fond brillant (²).

En superposant des cristaux obliques de même épaisseur, de manière que leurs sections principales soient parallèles et non leurs axes, on découvre les franges connues sous le nom de Ohm : on ne les voit bien qu'en lumière homogène. Suivant l'inclinaison des coupes, on obtient des ellipses, des lignes droites, ou enfin des hyperboles centrées conjuguées non équilatères.

Quand les sections principales des cristaux superposés sont croisées, les hyperboles deviennent équilatères, mais elles ne sont centrées que lorsque les cristaux sont parallèles à l'axe. Ces dernières franges se voient en lumière blanche : le nicol doit être à l'extinction et les sections principales des lames dans l'azimut 45°.

Ces expériences sont réalisables avec des quartz, des spaths et, en général, avec toute espèce de lames parallèles, voire même avec des gypses, bien que ces cristaux soient biaxes.

Les sels de Seignette à base de potasse ou d'ammoniaque cristallisent tous dans le système orthorhombique et ont

(¹) *Journal de Physique*, VIII, 226; 1879.

(²) *Annales de Chimie et de Physique*, 4ᵉ série, XX, p. 207; 1870.

même écartement des axes, d'environ 76°; on ne peut les distinguer l'un de l'autre que par la position du plan des axes optiques; il contient la petite diagonale de la base dans le sel potassique et la grande dans le sel ammoniacal. Or, ces cristaux isomorphes peuvent être combinés, et une certaine proportion des deux sels donne lieu à un cristal uniaxe, au moins pour une couleur déterminée. Cette remarquable expérience est due à M. de Norremberg : elle a fourni à de Senarmont l'explication des micas uniaxes. On sait, en effet, que l'écart des axes dans cette espèce cristalline varie de 0 à 77°.

Ce mélange peut être produit artificiellement en croisant alternativement des lames de mica très minces en nombre assez considérable. M. Steeg, de Hambourg, a réalisé six combinaisons définies que possède notre cabinet de Physique. Les voici par ordre :

Combinaisons.	A	B	C	D	E	F
Nombre de lames........	1	2	4	8	12	24
Valeur en ondes par lame.	3λ	$\frac{3}{2}\lambda$	$\frac{3}{4}\lambda$	$\frac{3}{8}\lambda$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{8}$

L'épaisseur totale des combinaisons est équivalente à 3λ pour chacune d'elles : mais, tandis que A donne des lemniscates, F montre des anneaux traversés par une croix noire, et c'est un véritable cristal uniaxe négatif.

En disposant les sections principales des lamelles en spirale, M. Reusch a reproduit tous les phénomènes de la polarisation rotatoire, et il a créé des quartz artificiels droits ou gauches [1].

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 4[e] série, XX, p. 207; 1870.

LXXXVII[e] MANIPULATION.

DÉTERMINATION DU SIGNE DES CRISTAUX.

Théorie.

Lorsque dans un cristal uniaxe l'indice extraordinaire est plus grand que l'indice ordinaire, le rayon extraordinaire semble attiré par l'axe, et le cristal est appelé *attractif* ou *positif;* lorsque, au contraire, l'indice ordinaire est le plus grand, le cristal est dit *répulsif* ou *négatif.*

Dans tous les cristaux à un axe, l'onde ordinaire est une sphère; mais l'onde extraordinaire est un ellipsoïde allongé comme un œuf dans les cristaux positifs, aplati comme une lentille dans les cristaux négatifs. Dans les premiers, la vitesse extraordinaire est la plus petite; dans les seconds, elle est la plus grande.

La ligne moyenne, ou bissectrice de l'angle aigu des axes des cristaux biaxes, correspond à l'axe optique des uniaxes : on est convenu d'appeler ordinaire le rayon dont les vitesses extrêmes diffèrent le moins. Si ce rayon est le plus rapide, les cristaux sont dits positifs, par analogie.

Description.

Nous nous servirons des appareils de polarisation décrits ci-dessus.

Manuel opératoire.

I. *Cristaux uniaxes :*

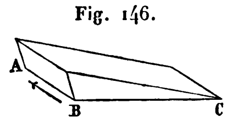
1° Supposons le cristal à étudier taillé en forme de prisme, dont l'arête réfringente soit parallèle à l'axe. Un rayon de lumière naturelle donnera à travers ce prisme deux rayons,

l'un ordinaire, l'autre extraordinaire, que l'on pourra facilement distinguer à l'aide d'une tourmaline dont l'axe sera dirigé perpendiculairement à l'arête du prisme : le rayon extraordinaire passera seul. S'il est le plus dévié des deux, le cristal est positif.

2° Les phénomènes de la polarisation chromatique dans la lumière convergente permettent de déterminer plus aisément le signe d'un cristal taillé perpendiculairement à l'axe.

On superpose à une plaque de ce genre une autre de signe connu, également propre à produire les anneaux : si les anneaux se resserrent, le signe des deux lames associées est identique ; ils se dilateraient dans le cas où les signes seraient contraires. Un cristal positif de quartz du Brésil ou de Madagascar (*fig.* 146), taillé en forme de prisme très aigu et dont l'arête AB est parallèle à l'axe, convient très bien pour cette expérience, car il suffit de le faire glisser sur la lame pour voir les anneaux se rétrécir ou se dilater.

Fig. 146.



3° Un mica quart d'onde (clivé perpendiculairement à la ligne moyenne), étant placé sur la lame uniaxe, donne lieu à un phénomène très curieux, duquel on peut déduire sans peine le signe du cristal. En effet, dirigeons le plan des axes du quart d'onde à 45° du plan de polarisation primitive, et mettons l'analyseur à l'extinction ; au lieu de la croix noire, nous verrons une croix grise qui divisera chaque anneau en quatre parties alternativement brillantes et sombres. Chacun de ces axes n'a plus une teinte uniforme : l'intensité y va en décroissant, depuis les branches de la croix jusqu'au milieu de l'arc où elle est nulle. Les deux premiers anneaux sont les plus marqués, et ils apparaissent comme deux taches noires vers le milieu du champ : quand la ligne *ab* qui les joint (*fig.* 147) est perpendiculaire à l'axe du mica, le cristal est positif ; il est négatif, quand elle est parallèle à l'axe du mica [1].

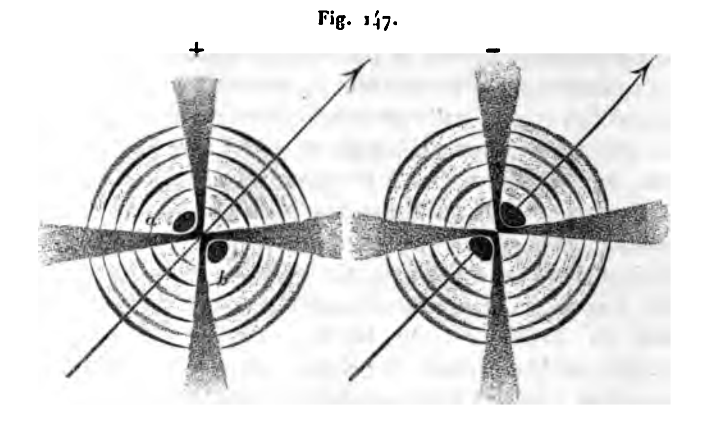
Pour les cristaux dont on ne peut se procurer que des lames

---

[1] M. Bertin a donné la théorie de ces faits dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, XIII, p. 240 ; 1868. Les anneaux qu'on observe étaient depuis longtemps connus sous le nom d'*anneaux d'Airy*.

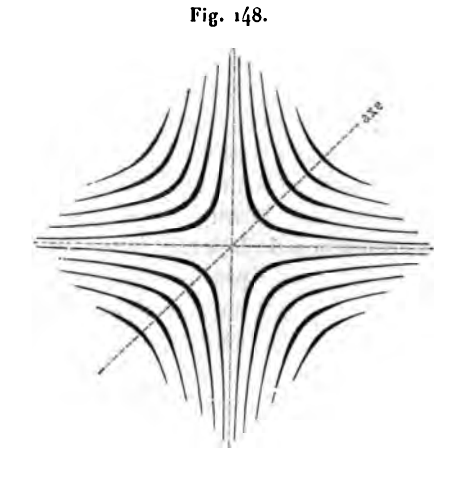
parallèles à l'axe, MM. Grailich et von Lang se sont servis des franges hyperboliques que donne une lame parallèle à l'axe en lumière convergente monochromatique (*fig.* 148); une lame

Fig. 147.



auxiliaire de signe connu permet de déterminer le signe d'un cristal uniaxe, pourvu que la différence entre les indices des

Fig. 148.



deux rayons soit petite. Supposons en effet les deux lames parallèles et de même signe et faisons tourner la lame d'épreuve autour d'un axe parallèle à la section principale de la lame à

essayer; les hyperboles s'élargiront. Elles s'élargiraient encore si les lames étaient de signe contraire et que la rotation eût lieu autour d'un axe perpendiculaire à la section principale de la lame à essayer.

Cette étude doit se faire nécessairement en lumière monochromatique, car les branches d'hyperbole ne sont distinctes avec la lumière blanche qu'autant que la lame est très mince.

II. *Cristaux biaxes:*

1° Pour reconnaître le signe de ces cristaux, on emploie souvent un procédé imaginé par Biot : superposant au cristal le prisme de quartz décrit précédemment, on l'introduit par le tranchant et on le fait glisser de manière à augmenter l'épaisseur traversée par les rayons convergents. Si le cristal est positif et que l'axe du quartz soit parallèle au plan des axes de la plaque considérée, les anneaux paraissent grandir et ils se rapprochent du centre, en figurant un huit couché, en même temps qu'un nouvel anneau se forme autour du pôle; si le cristal était négatif, les anneaux s'avanceraient vers les axes.

Généralement, on porte uniquement son attention sur l'orientation de la lame prismatique, nécessaire pour faire marcher les anneaux vers le centre; si le mouvement a dû être dirigé parallèlement au plan des axes optiques, c'est-à-dire à leur bissectrice obtuse, on conclut au signe positif; un mouvement perpendiculaire annoncerait un cristal négatif.

2° M. de Norremberg a perfectionné ce procédé de la manière suivante.

Il commence par orienter le cristal à étudier de manière que les pôles des lemniscates soient dans l'azimut 45°, et il observe ces courbes à travers un quartz perpendiculaire, placé entre l'oculaire et l'analyseur. En faisant tourner alors ce quartz autour d'une ligne parallèle ou perpendiculaire à la ligne des pôles, il voit naître au centre du champ des parties ondulées de lemniscates, analogues aux hyperboles mobiles de Savart; si ce phénomène accompagne une rotation autour d'une perpendiculaire à la ligne des pôles, le cristal est positif; sinon l'on aurait affaire à un cristal négatif.

Résultats.

Cristaux uniaxes.

Positifs.	Négatifs.
Apophyllite.	Anatase.
Boracite.	Apatite.
Dioptase.	Béryl.
Glace (HO).	Corindon.
Phénakite.	Émeraude.
Quartz.	Idocrase.
Scheelite.	Mellite.
Stannite.	Mica.
Sulfate de potasse.	Néphéline.
Tungstate de zinc.	Octaédrite.
Zircon.	Rubellite.
	Rubis.
	Saphir.
	Spath.
	Tourmaline.
	Vernérite.

Cristaux biaxes.

Positifs.	Négatifs.
Acétate de cuivre.	Aragonite
Albite.	Axinite.
Andalousite.	Borax.
Anhydrite.	Brookite.
Barytine.	Céruse.
Calamine.	Cordiérite.
Clinochlore.	Disthène.
Cymophane.	Mica.
Diopside.	Nitre.
Épidote.	Orthose.
Euclase.	Senarmontite.
Gypse.	Stilbite.
Harmotome.	Sulfate de zinc.
Labradorite.	Sulfate de magnésie.

Cristaux biaxes (suite).

Positifs.	Négatifs.
Mésotype.	Sucre de canne.
Oligoclase.	Talc.
Péridot.	
Platinocyanure d'ytrium.	
Prehnite.	
Sel de Seignette.	
Sphène.	
Staurotide.	
Sulfate de potasse.	
Topaze.	

LXXXVIIIe MANIPULATION.

MESURE DE L'ÉCARTEMENT DES AXES.

Théorie.

L'angle des axes optiques n'est pas le même dans tous les cristaux; pour une substance déterminée, il varie encore d'une couleur à l'autre et il change même plus ou moins avec la température.

Pour opérer la mesure de cet angle, on taille le cristal perpendiculairement à la bissectrice aiguë, et, le faisant tourner sur lui-même, on amène successivement les deux foyers des lemniscates dans l'axe optique de l'appareil de polarisation. L'angle dont le cristal a tourné est égal à l'angle apparent des axes, c'est-à-dire à celui des directions que suivent dans l'air les rayons qui ont traversé le milieu biréfringent suivant les axes.

Connaissant l'indice de réfraction moyen n du cristal, on peut calculer la valeur de l'angle intérieur; en effet, appelons $2V$

l'angle apparent mesuré, $2x$ l'angle cherché, nous écrirons

$$\frac{\sin V}{\sin x} = n.$$

Quand l'écart des axes est trop grand dans l'air, on opère dans l'huile ou dans un mélange d'alcool et de sulfure de carbone, d'indice 1,50 environ, suivant la méthode indiquée par M. Grailich : les deux nicols sont fixés sur la cuve même dans laquelle est renfermé le liquide auxiliaire.

Description.

Les microscopes polarisants se prêtent généralement à la mesure des angles des axes ; on les renverse horizontalement et on remplace les glaces par un nicol polariseur, ainsi que le représente la *fig.* 149.

La plaque est supportée par une pince A, mobile sur un cercle divisé ; le vernier, dont l'alidade est munie, permet d'estimer le $\frac{1}{10}$ de degré.

Pour donner à l'œil un point de repère, l'oculaire C porte un réticule à trois fils, dont l'un croise les deux autres à angle droit, ou bien un micromètre gravé sur verre.

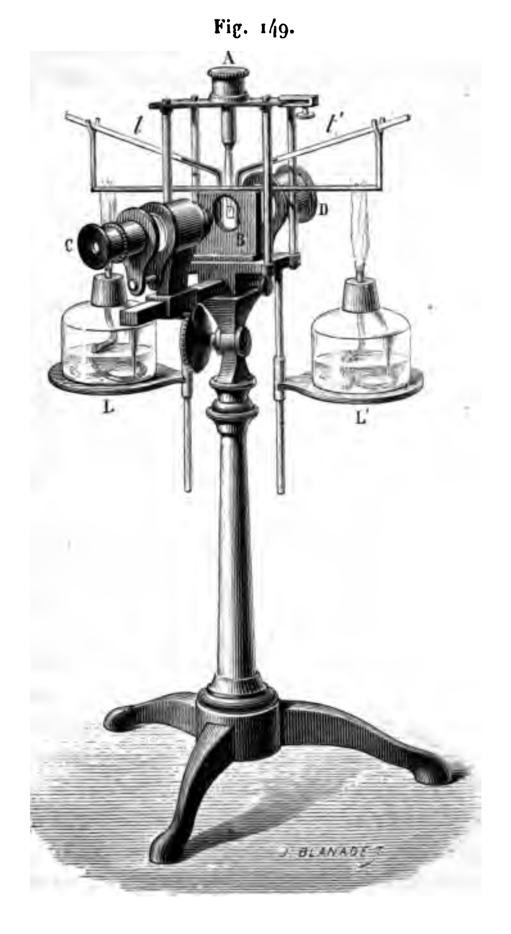
Quand on veut mesurer les angles à diverses températures, on enferme le cristal dans une étuve à air en cuivre rouge B, dont les ailes sont chauffées par deux lampes à alcool L et L'; les thermomètres inclinés t et t' marquent la température. On peut aller jusqu'à 300°, en évitant toutefois de maintenir longtemps cette température, car le collage des nicols pourrait en souffrir.

Ce dispositif, qui est dû à M. Laurent, permet encore d'opérer dans l'huile ; mais, dans ce cas, il est nécessaire d'amener l'objectif du microscope au contact de la cuve, de manière à reproduire les conditions de l'expérience de M. Grailich. On emploie ordinairement de l'huile d'olive décolorée par exposition au soleil.

Manuel opératoire.

' Les deux nicols étant croisés, on cherche par tâtonne-
ıt à obtenir deux systèmes d'anneaux colorés bien symé-

Fig. 149.



ues par rapport à l'axe de l'appareil; la droite menée du
r d'un système d'anneaux au foyer de l'autre doit être
allèle au cercle divisé, donc horizontale.

Quelques opérateurs préfèrent placer l'axe à 45° des sections principales des nicols, parce que les branches d'hyperbole ainsi obtenues peuvent faciliter la détermination exacte des centres des anneaux.

2° On amène un des foyers devant l'œil, en coïncidence avec le centre du micromètre, et l'on note la division sur laquelle s'est arrêté le vernier.

3° Faisons maintenant tourner la tige qui traverse le limbe gradué; le second foyer devra s'arrêter au même point de repère que ci-dessus.

L'angle de rotation est égal à 2V.

4° On en déduit $2x$ par le calcul.

Résultats.

Substances.	Indice moyen.	Angle des axes pour le jaune.
		°
Cordiérite............	1,54	39.30
Diopside...............	1,68	58.57
Aragonite..............	1,63	17.50
Barytine...............	1,64	36.59
Plomb carbonaté........	2,00	8. 7

Le déplacement des axes par la chaleur s'observe dans la glaubérite, la kaluszite, la heulandite et le feldspath. Mais c'est dans le gypse que ce phénomène se présente avec le plus d'intensité et s'étudie avec le plus d'intérêt.

A la température ordinaire, les axes sont écartés d'environ 58°; vers 92°, ils se confondent et le cristal paraît uniaxe; à partir de ce moment, ils s'écartent de nouveau, mais dans un plan perpendiculaire au premier. Il est prudent de ne pas poursuivre l'expérience au delà de 120°, car il ne resterait bientôt qu'un fragment de plâtre à la place du cristal transparent qui produit ces curieuses apparences.

Quand on connaît les trois indices n', n'', n''', on peut calculer l'angle de l'un des axes avec la ligne de plus grande élasticité par la formule

$$\tang\theta = \frac{n'''}{n'}\sqrt{\frac{n'^2 - n''^2}{n''^2 - n'''^2}};$$

gle des axes est $\pi - 2\theta'$, quand le cristal est positif, et $2\theta'$ nd il est négatif : il est possible de contrôler de la sorte le ltat direct de l'observation. Généralement les valeurs obées diffèrent peu des valeurs calculées, ainsi qu'en témoigne ableau suivant :

Substances.	Angles observés.	Angles calculés.
	° ′	° ′
Diopside	58.57	56.16
Chlorure de baryum	67. 4	68.24
Calamine	45.57	44.56
Gypse	57.31	57.28

es déterminations ont été faites par M. Des Cloizeaux.

LXXXIX[e] MANIPULATION.

ÉTUDE DE LA RÉFLEXION MÉTALLIQUE.

Théorie.

près réflexion sur une surface métallique, un rayon polа- dans les azimuts principaux déterminés par le plan d'incice et le plan perpendiculaire reste polarisé dans le même ı.

ais, lorsque le rayon incident est polarisé dans un plan quelque, la réflexion métallique donne naissance à une vibration ›tique.

our étudier les effets de cette réflexion, deux éléments sont eterminer : les modifications d'amplitude ou d'intensité et changements de phase.

. Jamin a effectué ces études photométriques (1) par un

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3[e] série, XIX, p. 297 (1847); XXII, 1 (1848); XIV, p. 365 (1850); XXXI, p. 265 (1851). *Cours de Physique de le Polytechnique*, par MM. Jamin et Bouty, III, 3[e] fasc., p. 513.

procédé indirect qui consiste à comparer l'intensité de la lumière réfléchie sur le métal à celle de la lumière réfléchie à la surface d'une lame de verre. On détermine l'incidence i sous laquelle ces intensités sont égales dans l'image ordinaire et extraordinaire; puis on calcule, au moyen des formules de Fresnel, l'intensité de la lumière réfléchie par le verre. Supposons la lumière incidente polarisée dans le plan d'incidence, et soit α l'angle de la section principale de l'analyseur avec le plan d'incidence : l'image extraordinaire fournie par le verre aura pour intensité $\sin^2\alpha \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}$; si nous représentons par x^2 l'intensité de la lumière réfléchie par le métal, nous aurons pour l'image ordinaire fournie par le métal $x^2 \cos^2\alpha$; d'où, en égalant ces deux valeurs,

$$x^2 = \tang^2\alpha \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}.$$

Mais il faut connaître r et, par conséquent, l'indice de réfraction du verre n : on peut se contenter de déterminer l'angle de polarisation I du verre et de poser $n = \cot \mathrm{I}$.

Pour mesurer les changements de phase, M. Jamin fait disparaître la différence de marche à l'aide de son compensateur décrit précédemment [1]; cet appareil étant gradué, il n'y a qu'à noter le déplacement du micromètre.

Description.

L'appareil de M. Jamin (*fig.* 150) se compose d'un limbe horizontal divisé, soutenu par un pied en cuivre à vis calantes. Il est muni de trois alidades A, B et C, que l'on règle par des vis de rappel : A et B portent des bonnettes de calibre.

Le tube M est muni d'un cercle azimutal sur lequel tourne un prisme de Nicol; la lumière partant de a' est rendue parallèle par une lentille et polarisée dans un azimut variable à volonté.

Après avoir été réfléchie, elle est reçue dans le tube N qui

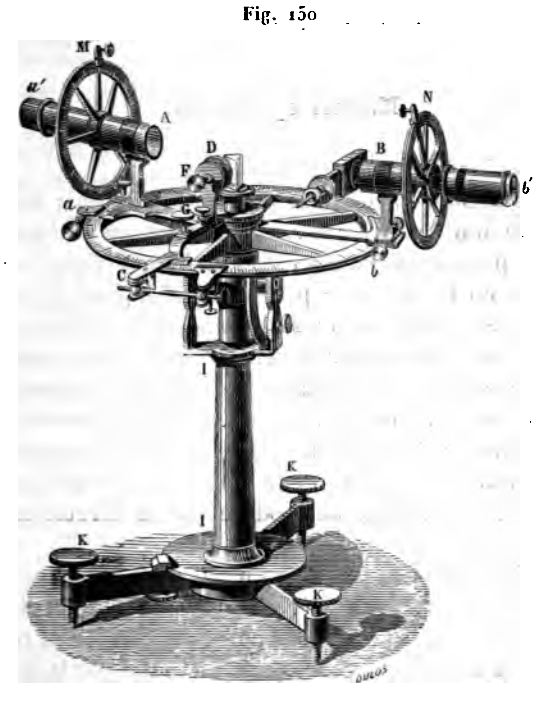
---

[1] *Vide supra*, p. 416.

ontient un second nicol ou mieux encore un spath achromatisé, ıobile autour de l'axe, et une lunette visant à l'infini pour onner une image nette de a'. Ce tube est muni d'un compenateur B.

La substance réfléchissante est fixée sur un support de orme spéciale dont on peut régler la verticalité par une vis :

Fig. 150



n produit l'affleurement au centre à l'aide d'une seconde vis ui commande une coulisse horizontale.

Les métaux sont préparés sous forme de petits disques pois, qu'on fixe au support à l'aide d'un peu de cire.

Un miroir de verre et le miroir du métal à étudier (au point e vue photométrique) sont assemblés, en prenant soin que eurs surfaces demi-circulaires soient dans un même plan et u'elles se raccordent par une ligne bien droite : ce miroir ouble se fixe comme les autres sur le support.

Pour opérer en lumière monochromatique, on recouvre l'ouverture a' d'un verre rouge. La lumière est fournie par une lampe Carcel qu'on peut placer dans une boîte fermée au foyer d'une lentille destinée à rendre les rayons parallèles.

Le cercle de M. Jamin présente dans son ensemble une grande analogie avec le goniomètre de Babinet : il supplée, du reste, fort bien cet instrument et se prête aussi à la détermination des longueurs d'onde par les réseaux.

Manuel opératoire.

I. *Déterminations photométriques.*

1° On polarise le rayon dans un plan horizontal; puis, avant de placer le double miroir sur son support, on amène l'analyseur sur le prolongement du rayon incident et l'on éteint l'une des images en tournant le prisme biréfringent. Il faut alors fixer l'alidade à l'aide de la vis de pression dont elle est munie.

2° On installe le miroir double, de telle sorte que le plan d'incidence soit perpendiculaire à la ligne de séparation du métal et du verre. Le critérium suivant témoigne de la verticalité du miroir : l'image qui était éteinte doit rester éteinte, car, le plan de polarisation et le plan d'incidence étant alors horizontaux, la réflexion ne modifie pas la direction du plan de polarisation.

3° On fait varier peu à peu la direction de la section principale de l'analyseur, de manière à rendre l'image ordinaire du métal égale à l'image extraordinaire du verre. On reconnaît facilement la moitié qui correspond au métal par la coloration même de l'image.

Quant à l'image extraordinaire, c'est celle qui est éteinte lorsque les deux sections principales sont croisées.

L'opérateur note l'angle α pour lequel l'égalité est réalisée.

4° En opérant de même, il cherche à quel angle α' correspond l'égalité de l'image extraordinaire du métal et de l'image ordinaire du verre; α' doit être complémentaire de α.

5° Il finit en relevant l'incidence par les verniers dont sont munies les alidades qui portent les deux tubes.

On procédera de même à de nouvelles déterminations, sous des incidences comprises entre 20° et 85°.

Il faut beaucoup d'attention dans cette manipulation, parce que la différence d'aspect et la distance des images à comparer constituent une difficulté sérieuse; cependant voici ce que dit M. Jamin dans son premier Mémoire :

« Les résultats des expériences faites dans les mêmes circonstances ne diffèrent jamais de plus de quinze minutes, et si l'on commet des erreurs plus graves, c'est que les points de repère, soit pour la mesure des incidences, soit pour la position des plans de polarisation, ne s'obtiennent pas toujours avec une aussi grande exactitude. Faisons remarquer d'ailleurs que, dans chaque quadrant, il y a deux angles α et $90° - \alpha$ qui rendent l'image ordinaire ou extraordinaire du métal égale à l'image extraordinaire ou ordinaire du verre; chaque détermination résulte donc de huit observations. »

II. *Mesure de la différence de phase.*

L'analyse de la lumière polarisée elliptiquement a fait l'objet de la LXXXV[e] manipulation; il suffira donc de rappeler sommairement la suite des opérations nécessaires dans le cas présent.

Nous supposerons le compensateur gradué, c'est-à-dire que la longueur L, dont il faut déplacer le prisme mobile pour produire une différence égale à $\frac{\lambda}{2}$, est connue.

1° Le compensateur est fixé à la partie antérieure du tube qui porte l'analyseur : on fait en sorte que l'axe du prisme de quartz tourné vers le rayon incident soit vertical; puis on dirige parallèlement entre elles les sections principales du polariseur et de l'analyseur, en les inclinant toutes deux d'un angle quelconque φ sur l'horizontale. On facilitera l'expérience en opérant d'abord sur un rayon polarisé dans un plan voisin de la verticale, car les deux composantes du rayon réfléchi auront alors des intensités comparables.

2° Le rayon arrivant directement du polariseur à l'analyseur, on amène le milieu de la frange centrale entre les deux lignes de repère.

3° La lame réfléchissante est fixée verticalement sur le support qui se trouve au centre du cercle.

4° Par un déplacement convenable des alidades, on cherche dans le champ de la lunette l'image de l'ouverture éclairée : il est bon de commencer les observations en se plaçant sous une incidence voisine de la polarisation la plus complète.

5° Si la différence de phase était nulle, la frange centrale resterait en place. Mais, lorsque la frange marche vers le sommet du prisme antérieur, la composante polarisée dans le plan d'incidence a de l'avance sur l'autre, du retard au cas contraire; on ramène la frange au milieu par un déplacement l. La différence de phase est donc égale à $\frac{L}{l}\frac{\lambda}{2}$.

6° On peut observer, outre le déplacement de la frange, sa diminution d'intensité, car elle pâlit en même temps qu'elle quitte le fil central. En faisant tourner l'analyseur, de manière à rendre la frange noire comme elle l'était précédemment, on détermine la position du plan de polarisation du rayon restauré, car il est alors confondu avec la section principale de l'analyseur. Cette opération est fort délicate.

Résultats.

Voici les résultats obtenus par M. Jamin sur l'acier :

Angles d'incidence.	Angles α.	Lumière polarisée dans le plan d'incidence.	Lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence.	Pouvoir réflecteur total.
°	° ′			
20	74.26	0,608	0,593	0,600
30	73. 3	0,624	0,577	0,600
40	71. 7	0,608	0,473	0,540
50	67.57	0,684	0,444	0,565
60	64.52	0,805	0,397	0,600
70	59.40	0,837	0,297	0,567
80	52. 9	0,893	0,298	0,595
85	48. 2	0,904	0,517	0,710

Pour avoir les amplitudes, il faut extraire les racines carrées des intensités.

Le minimum correspond à une incidence de 76° pour l'acier; pour le métal des miroirs, il paraît aussi exister un minimum

re 50° et 60°; le pouvoir réflecteur croît ensuite jusqu'à l'in-
ɜnce rasante.

Différences de phase δ.

δ en fraction de $\frac{\lambda}{2}$.	Acier. — Incidences.	Argent plaqué. — Incidences.
	° ′	° ′
0,900	45.27	37.10
0,700	58.37	60.10
0,500	76. 0	72. 0
0,400	79. 0	76.42
0,300	»	80.20
0,200	84. 0	80.50

.a différence de marche étant égale à un quart d'onde sous cidence de 76° pour l'acier, la lumière réfléchie sera pola-ŝe circulairement, lorsque les deux rayons composants se-ıt égaux; et, en effet, on trouve par tâtonnement un azi-t α pour lequel les deux images de l'analyseur sont égales; quart d'onde reproduit la polarisation rectiligne.

CHAPITRE XVII.

POLARISATION ROTATOIRE.

XCe MANIPULATION.

DÉTERMINATION DES POUVOIRS ROTATOIRES.

Théorie.

Biot a appelé *pouvoir rotatoire d'une substance* la déviation qu'elle imprime au plan de polarisation lorsqu'elle agit sous une épaisseur de 1mm avec une densité égale à 1. Ainsi, une plaque de quartz, qui fait éprouver aux rayons rouges une rotation de 38°, sous une épaisseur de 2mm et pour une densité de 2,6, a un pouvoir rotatoire moléculaire égal à

$$\frac{38}{2.2,6} = 7^\circ 30';$$

si l'échantillon proposé est dextrogyre, on écrit

$$+[\alpha]_r \quad \text{ou bien} \quad [\alpha]_r^{\nearrow};$$

s'il est lévogyre,

$$-[\alpha]_r \quad \text{ou bien} \quad [\alpha]_r^{\nwarrow}.$$

La même définition convient aux corps solides et aux corps liquides, sauf qu'on rapporte les pouvoirs de ces derniers au décimètre, parce qu'ils sont très faibles.

En général, α étant une rotation observée pour une épaisseur l et une densité d, on peut écrire

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{ld}.$$

Lorsqu'il s'agit d'une substance active en dissolution dans un liquide inactif, en supposant qu'un poids ε de cette substance soit dissoute dans un poids $(1 - \varepsilon)$ de liquide et que δ soit la densité de la dissolution, on aura

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{l\varepsilon\delta}.$$

Quand on connaît le poids p de substance active que contient un volume v de dissolution, on peut écrire plus simplement encore

$$[\alpha] = \frac{\alpha v}{lp}.$$

Le pouvoir dispersif comparé des rayons rouge et jaune $\frac{[\alpha]_r}{[\alpha]_j}$ est aussi un caractère spécifique des corps. Pour le déterminer, on opère tour à tour en lumière blanche et rouge : dans le premier cas, on observe la teinte sensible, qui correspond à l'extinction du jaune ; dans le second, on s'arrête à l'extinction de l'image dans le rouge ; ces deux expériences donnent $[\alpha]_j$ et $[\alpha]_r$.

Description.

Nous nous servirons, dans cette manipulation, de l'appareil de Biot : il donne des résultats d'une exactitude remarquable, mais il exige un grand nombre de précautions fort minutieuses, que nous exposerons rapidement [1].

Biot n'opérait jamais qu'à la lueur des nuées et il avait soin de choisir un jour où le ciel fût entièrement couvert, afin d'éviter toute trace de polarisation. La lumière était réfléchie et polarisée par un miroir de verre noir, fixé à l'extérieur de

[1] BIOT, *Instructions pratiques sur l'observation et la mesure des propriétés optiques appelées rotatoires*, 1845.

la chambre obscure contre le volet, comme un porte-lumière ordinaire.

Le corps de l'appareil était établi à demeure dans un petit cabinet obscur construit pour ce but, dans lequel l'observateur s'enfermait pour observer. La lumière, renvoyée à l'intérieur par le réflecteur, traversait des tuyaux noircis, munis de diaphragmes, où elle était restreinte en un mince faisceau cylindrique, dont tous les éléments parallèles étaient sensiblement dans un même état de polarisation. Biot tenait beaucoup à ce dispositif : « Il n'y a, dit-il, que la pratique personnelle qui puisse faire comprendre tout ce que cet arrangement donne de sûreté, de précision et de délicatesse aux résultats obtenus... Je me suis bien gardé de l'abandonner pour le motif vain et condamnable de rendre ces phénomènes plus populaires en sacrifiant la certitude de détermination indispensable pour leur utilité scientifique (1). »

Les pièces essentielles de l'appareil de Biot sont le tube à liquide et l'analyseur. Le tube est fermé à ses deux extrémités par deux glaces de verre ; il porte souvent à l'intérieur deux diaphragmes en argent, percés d'un trou étroit, afin d'arrêter la lumière qui pénétrerait accidentellement dans le tube. L'analyseur se compose d'un prisme de spath achromatisé par du crown : il donne deux images colorées de teintes brillantes et complémentaires, qui ne disparaissent point, quelle que soit la position de l'analyseur. Ce prisme doit être achromatisé aussi exactement que possible pour l'image extraordinaire, qui est celle dont les teintes servent le plus spécialement d'indices pour les déviations.

Quand on opère en lumière blanche, on prend pour repère la teinte de passage, ou teinte sensible, dans l'image extraordinaire : c'est un bleu violacé pâle qui touche au bleu franc ou bien au rouge vif pour le moindre déplacement de l'analyseur ; dans le faisceau ordinaire, la lumière est jaune, et elle tourne au vert ou à l'orangé. Mais nous devons faire observer que cette teinte n'est pas la plus sensible pour tous les yeux : or il est de la plus grande importance pour un physicien de reconnaître la couleur à laquelle son œil est le plus

(1) *Loc. cit.*, p. 29.

sensible; il y parviendra sans peine par un procédé très ingénieux fondé sur l'emploi d'un biquartz à rotations inverses, de $3^{mm},75$ d'épaisseur; nous ne pouvons que mentionner ici cette méthode, qui sera exposée en son temps dans la manipulation suivante [1].

Biot recommande instamment de constater que les plaques de verre qui ferment les tubes n'exercent aucune action polarisante qui leur soit propre, par un effet de trempe; sinon, il faudrait les rejeter ou les faire recuire. On évitera aussi, dans le cours des opérations, de visser trop fortement les viroles qui fixent les obturateurs pour ne pas comprimer le verre, car il pourrait acquérir ainsi les propriétés du verre trempé.

Le cercle azimutal, sur lequel on observe les angles dont il faut tourner l'analyseur pour reproduire la teinte sensible, doit donner au moins la minute : Biot évaluait en centièmes les fractions de degré.

Les supports des tubes et de l'analyseur peuvent être montés au besoin sur le banc d'optique : on ne trouve plus guère, dans les laboratoires, le dispositif employé par Biot, car il est compliqué et encombrant, et il ferait double emploi avec les saccharimètres. Il est cependant nécessaire que les élèves reproduisent les expériences magistrales qui ont servi de fondement à la théorie de la polarisation rotatoire.

Manuel opératoire.

1° Il faut d'abord donner au rayon réfléchi l'état de polarisation le plus complet qu'il puisse recevoir : pour cela, le miroir est placé sous l'incidence brewstérienne. L'image extraordinaire doit alors être complètement éteinte quand l'alidade du prisme biréfringent est au zéro : les vis de correction dont la bonnette est munie permettent d'atteindre rigoureusement ce premier résultat.

On constate de plus, en tournant l'alidade de l'analyseur sur toute la circonférence du cercle azimutal, que les images ordinaire et extraordinaire s'évanouissent dans les quatre quadrants

---

[1] *Vide infra*, p. 458.

comptés à partir du zéro. Il ne faut jamais négliger cette épreuve, car les seuls changements de température des montures métalliques peuvent déplacer le zéro.

2° On dispose sur le chemin du faisceau polarisé le cristal taillé ou le liquide dont on se propose de déterminer le pouvoir rotatoire.

Si l'on opère sur une lame de quartz, par exemple, il est indispensable de l'orienter de façon qu'elle soit traversée par le rayon lumineux suivant l'axe du cristal : la moindre déviation entraînerait des erreurs considérables. Les spirales d'Airy permettent de reconnaître d'abord, avec l'appareil de Norremberg, que les faces taillées sont perpendiculaires à l'axe ; il ne reste plus alors qu'à vérifier si le rayon tombe normalement sur la plaque, en amenant le réticule de l'oculaire à coïncider avec les images données par les deux faces du cristal. Il faut pour cela un réticule fortement éclairé.

Lorsqu'on peut faire usage des tubes, on fixe d'abord un obturateur à leur partie inférieure ; puis, on verse doucement le liquide jusqu'à ce qu'il déborde extérieurement par un petit ménisque capillaire. On écrase ce ménisque en appliquant le second obturateur, ce qui laisse le tube complètement plein, sauf quelque très petite bulle d'air qui y reste parfois, mais ne peut empêcher les observations.

Les longueurs des tubes doivent être mesurées soigneusement entre les plans qui les terminent, au moyen de compas d'épaisseur très exacts ; mais le constructeur prend généralement la précaution de graver sur le tube sa longueur.

3° Si le corps interposé est inactif, l'image extraordinaire reste éteinte. Sinon, elle reparaît colorée : l'angle dont il faudra tourner l'analyseur pour produire la teinte sensible indique la rotation produite par la colonne de liquide ou la substance essayée, et fournit les éléments du calcul de $[\alpha]_j$.

4° Quand on cherche le pouvoir dispersif, on a besoin de déterminer encore $[\alpha]_r$; à cet effet, on recouvre l'analyseur d'un verre rouge, et l'on cherche à éteindre l'image extraordinaire.

Mais la position de l'analyseur pour laquelle cette extinction a lieu est moins bien définie que précédemment, et il peut exister une incertitude de plusieurs degrés. Pour faire une dé-

termination exacte, il faut tourner lentement l'analyseur jusqu'au moment où l'on cesse d'apercevoir l'image: on fait alors une première lecture, puis on continue la rotation en dépassant la position pour laquelle l'image reparaît. On revient ensuite lentement en arrière, et l'on fait une deuxième lecture au moment où l'image disparaît de nouveau. La moyenne des deux lectures donne la position véritable du plan de polarisation. Biot faisait jusqu'à huit ou dix moyennes.

5° Le signe de la polarisation rotatoire est défini par le sens de la rotation. La droite est définie par celle d'un homme supposé couché dans le rayon, les pieds tournés du côté d'où vient ce rayon : c'est donc la droite de l'observateur.

Toutefois, remarquons que la teinte sensible s'obtient aussi bien par une rotation à gauche qu'à droite; il importe donc de donner le caractère précis par lequel on différencie les dextro des lévogyres. Il ne peut subsister aucune incertitude en lumière blanche, si l'on observe l'ordre dans lequel les couleurs se succèdent. Quand on tourne de gauche à droite ↗ et que l'on voit apparaître le bleu avant la teinte sensible et le rouge après elle, la substance est dextrogyre.

Résultats.

J'emprunte à un Mémoire de Biot les chiffres suivants :

Matière observée.	Proportion pondérale ε.	Densité de la solution δ.	Longueur en millimètres l.	Déviation α.
Sucre en pains..	0,333984	1,14584	1,4775	+ 42°,100
Sucre candi....	0,332022	1,143043	1,4775	+ 42°,100

Le sucre avait été broyé, incomplètement trituré, puis on avait tenu les débris pendant vingt-quatre heures dans une étuve à la température de 60°. Il résulterait de cette expérience que le pouvoir rotatoire du sucre en pains serait de 74°,457 et celui du candi de 74°,897.

Pour se dispenser de déterminer δ, on emploie préférablement la formule $\frac{\alpha v}{lp}$: dissolvant donc p grammes de sucre, de

manière à former v centimètres cubes de liqueur, on opère dans un tube de longueur l.

On admet généralement les valeurs suivantes pour les pouvoirs rotatoires du sucre de canne :

$$[\alpha]_j = +73^\circ{,}8,$$
$$[\alpha]_r = +56^\circ{,}5.$$

Mais M. Tollens a constaté que ce pouvoir spécifique diminue à mesure que la concentration de la liqueur augmente ; le pouvoir rotatoire du sucre solide ne serait d'après lui que de

$$63^\circ{,}900.$$

La formule suivante, dans laquelle q représente le poids d'eau pour 100 de dissolution, permet de déterminer le pouvoir correspondant à une dilution supérieure à 18 pour 100 [1].

$$[\alpha]_j = 63{,}9035 + 0{,}064685\,q - 0{,}000379\,q^2.$$

Le Tableau ci-dessous donne les pouvoirs rotatoires de quelques substances, pour la lumière jaune :

1° *Cristaux.*

(Sous 1 millimètre d'épaisseur.)

Quartz	21°,67
Chlorate de soude	3,66
Cinabre	325,00
$NaO, 2U^2O^3, 3C^4H^3O^3$	1,76
Sulfantimoniate de sulfure de sodium	2,44

2° *Dissolutions.*

(Sous 1 décimètre d'épaisseur.)

Sucre de canne	+ 73°,8
Sucre interverti à 15°	— 26,5
Lévulose à 15°	—106,0
Dextrine	+138,7
Camphre du Japon	+ 47,4
Camphre de matricaire	— 43,4
Sulfate de quinine	—193,0

(1) *Journal de Physique*, VIII, p. 245 ; 1879. D'après les derniers travaux de MM. Girard et de Luynes, on aurait $[\alpha]_D = 67^\circ{,}18'$ ou $67^\circ{,}31$.

D'après M. Landolt, il y aurait 120 substances naturelles actives, dont 60 gauches, 50 droites et 10 droites et gauches : on en trouve l'énumération complète dans le Tome VII du *Journal de Physique*, p. 237 et suivantes.

Biot avait cru établir expérimentalement que le pouvoir rotatoire spécifique des substances était indépendant de la nature du dissolvant inactif employé ; l'acide tartrique seul faisait exception. Or M. Oudemans a démontré que, pour les alcaloïdes, le pouvoir varie considérablement avec le dissolvant, et voici un résultat des plus curieux que nous signalons pour clore cette manipulation. La dissolution de cinchonine dans le chloroforme a un pouvoir de $+212°$, pour une concentration de 0,005 environ ; quelques gouttes d'alcool portent le pouvoir à $+237°$, mais un grand excès le fait décroître, et la dissolution dans l'alcool pur n'a plus qu'un pouvoir de 228° (1).

Pouvoirs dispersifs.

Quartz	$\frac{22}{30}$
Sucre de canne	$\frac{23}{30}$
Sulfate de quinine	$\frac{23}{30}$

Biot n'a pas trouvé de rapport de dispersion plus grand que $\frac{24}{30}$ ou plus petit que $\frac{21}{30}$; mais Buignet assigne à la santonine un pouvoir dispersif de $\frac{18}{30}$.

(1) *Journal de Physique*, II, p. 223 (1873) ; extrait des *Annales de Poggendorff*, CXLVIII, p. 337, même année. Pour la brucine, le pouvoir rotatoire de la solution dans le chloroforme est plus que le triple du pouvoir correspondant dans la solution alcoolique.

XCIᵉ MANIPULATION.

USAGE DU SACCHARIMÈTRE SOLEIL.

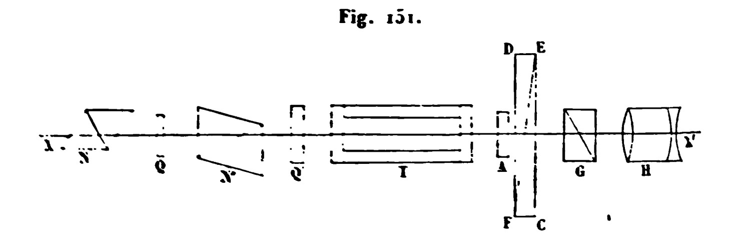
Théorie.

Mitscherlich avait modifié et rendu plus maniable l'instrument de Biot en plaçant le tube à essayer entre deux nicols : sous cette forme, il fut adopté par les fabricants de sucre, qui déduisaient de la rotation du plan de polarisation la teneur d'une dissolution sucrée. Soleil augmenta la précision des mesures par l'addition de son biquartz et de quelques accessoires, qui constituèrent définitivement le saccharimètre : c'est dès lors un instrument pratique, qui ne convient plus aux déterminations scientifiques de la précédente manipulation.

Description.

La lumière est polarisée par un prisme de nicol N′ (*fig.* 151) rendu achromatique ; elle est ensuite reçue sur le biquartz Q′,

Fig. 151.



puis elle traverse le tube T ; enfin, elle rencontre le quartz A dextrogyre et le compensateur CD, auquel succède l'analyseur biréfringent G et une lunette de Galilée H visant en Q′. Nous n'avons à décrire que le biquartz et le compensateur.

Le premier est formé de deux moitiés demi-circulaires de quartz dextro et lévogyres, de $3^{mm},75$ d'épaisseur, qui impriment l'une et l'autre une rotation de 90° au plan de polarisation des rayons jaunes moyens; lorsque la lumière transmise par ces deux moitiés tombe sur l'analyseur, elle développe la teinte de passage dans les deux parties de l'image, si la section principale de ce prisme est perpendiculaire au plan primitif de polarisation. Le biquartz fournit donc un repère à l'observation; le compensateur sert à reproduire l'apparence des images obtenues avant l'interposition du tube en mesurant l'effet produit; il se compose de deux prismes de quartz lévogyres dont le grand côté est perpendiculaire à l'axe.

N et Q forment le producteur de teintes sensibles : on le place plus commodément contre l'oculaire. Il suffit de tourner la virole qui porte N et Q pour produire n'importe quelle teinte et décolorer par conséquent le rayon qui a traversé le sirop en donnant naissance à sa teinte complémentaire. Cependant, si le rouge domine trop dans la dissolution sucrée, ce mode de compensation devient insuffisant et il faut alors décolorer ces mêmes dissolutions sans fausser leur titre : ce résultat s'obtient par le sous-acétate de plomb.

L'instrument de Soleil est d'une exactitude irréprochable tant qu'on ne le détourne pas de sa destination spéciale, la saccharimétrie (1) : c'est, du reste, un appareil très simple. Les pièces mobiles sur lesquelles l'opérateur doit agir sont peu nombreuses : il met au point en réglant le tirage, puis, la teinte sensible étant produite par l'anneau moleté qui se trouve généralement à la suite de l'oculaire, il rend la couleur des deux parties de l'image parfaitement uniforme en agissant sur le grand bouton à axe vertical qui commande le compensateur, et il lit sur la règle divisée le nombre qui donne la richesse saccharine du liquide soumis à l'examen.

Lorsque le sucre de canne est accompagné par des substances de nature diverse, ayant comme lui une action sur la lumière polarisée, l'observation directe ne suffit plus, car il peut arriver qu'on n'observe qu'une différence d'effets; il faut alors

(1) On lira à ce sujet, avec beaucoup de fruit, un intéressant Mémoire lu par Biot à l'Académie dans la séance du 23 juin 1845.

intervertir le sucre et procéder à une seconde observation [1]. L'inversion se fait par l'acide chlorhydrique fumant, dans un petit ballon présentant deux traits de jauge, qui correspondent l'un à 50cc, l'autre à 55cc : on chauffe le mélange au bain-marie et on l'introduit dans un tube spécial, de 220mm de longueur, alors que les tubes ordinaires n'ont que 200mm. Ce tube, destiné au sucre interverti, porte en son milieu une tubulure verticale par laquelle on introduit un thermomètre sensible au demi-degré. Le sucre de canne, devenu glucose lévogyre, produit une déviation en sens contraire de celle qu'on avait d'abord observée : on en déduit le titre exact de la première solution à l'aide des Tables de Clerget, que nous donnons plus loin.

La lumière employée pour l'observation peut être indifféremment la lumière du ciel ou celle d'une lampe : il est avantageux d'opérer dans une chambre noire.

Réglage du saccharimètre [2]. — 1° On remplit d'eau pure un tube semblable à celui qui contient la dissolution sucrée et on le met dans l'appareil à la place qui lui est réservée. La mise au point s'effectue par rapport à la ligne de séparation des deux quartz, qui doit apparaître bien tranchée et bien nette. En tournant le bouton du compensateur, on rend les teintes des demi-disques parfaitement identiques; mais ce n'est pas tout de rendre cette teinte uniforme, il faut encore qu'elle soit la plus sensible pour l'observateur, car, ainsi que nous l'avons déjà dit, tous les yeux ne jugent pas de même les teintes colorées.

Pour déterminer en quelque sorte son équation personnelle, l'observateur tourne la molette du producteur de teintes jusqu'à ce que les deux moitiés de l'image soient du même jaune; puis, continuant très doucement cette rotation, il compare attentivement le vert, le bleu, l'indigo et le violet qui succèdent au jaune. Le plus souvent, il rencontrera une certaine nuance pour laquelle l'uniformité de teintes établie pour le jaune n'existera plus : recommençant plusieurs fois et à des jours différents, il constatera que ce phénomène a toujours lieu

---

(1) T. Clerget, *Analyses des substances saccharifères* (*Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, XXVI, p. 175; 1849).

(2) J. Duboscq, *Pratique du saccharimètre Soleil*, 1876.

dans une même couleur; cette teinte est celle à laquelle il est le plus sensible. Pour le plus grand nombre des yeux, elle est d'un bleu violacé, couleur fleur de lin : mais quelquefois elle se rapproche beaucoup du rouge ou du bleu; dans ce cas, l'observateur est assurément moins bien doué pour l'usage du saccharimètre Soleil et je n'hésite pas à lui en déconseiller l'emploi.

2° La règle d'ivoire qui porte la graduation doit, à ce moment, se trouver au zéro; si la coïncidence n'est point parfaite, il faut l'établir, en tournant la petite vis horizontale qui se trouve à l'extrémité gauche de la règle.

L'instrument est dès lors réglé.

Manuel opératoire.

1° $16^{gr},471$ de sucre sont pesés avec soin, concassés et triturés dans un mortier et enfin desséchés à l'étuve, pendant plusieurs heures; puis on les introduit dans un matras à fond plat et à col étroit avec un peu d'eau distillée froide. La dissolution étant complète, on y ajoute la quantité d'eau nécessaire pour former 100^{cc}.

Le poids de $16^{gr},471$ est celui qui produit, dans les conditions de l'expérience, la même déviation qu'un quartz de 1^{mm}, lorsque le sucre est parfaitement sec et pur; plusieurs auteurs ont démontré que ce chiffre est trop fort, et les uns l'ont réduit à $16^{gr},350$, les autres à $16^{gr},190$. Je conserverai cependant la première valeur, parce qu'elle a servi de base à la Table de Clerget, et qu'on peut facilement corriger l'erreur qu'elle produit sur le résultat final.

Lorsque le sucre proposé est fortement coloré, on le clarifie par 2^{cc} ou 3^{cc} d'une solution saturée de sous-acétate de plomb; ayant alors seulement complété le volume à 100^{cc}, on agite vivement et l'on filtre. Quelquefois on est obligé de filtrer sur du noir animal en grains fins. Dans ce cas, il est à conseiller d'opérer sur une quantité de sucre et d'eau triple de celle qui a été indiquée ci-dessus; le noir occupera en volume le quart de la liqueur à blanchir, soit environ 75^{cc}. On l'humecte d'abord avec une partie de la liqueur, puis on verse le reste

qui ne tarde pas à filtrer. Si l'on recueillait indistinctement la totalité de la liqueur, le titre serait altéré, car le charbon exerce d'abord une absorption sur le sucre; mais, en séparant la première partie de la filtration, soit une quantité sensiblement égale à celle du charbon, la liqueur qui passe ensuite conserve son titre primitif, bien que, pour obtenir une décoloration complète, on la reverse à plusieurs reprises sur le noir.

2° Un tube de 200^{mm} est rempli de la liqueur sucrée et porté sur le saccharimètre; on rétablit d'abord la teinte sensible, puis on rend aussi égales que possible les teintes des deux moitiés du disque. Il n'y a plus qu'à chercher à quelle division de l'échelle correspond le trait de l'indicateur. Le nombre relevé donne immédiatement et sans calcul le titre en centièmes du sucre proposé.

3° Il est resté dans le matras de 100^{cc} une certaine quantité de liquide : on en prélève 50^{cc} qu'on verse dans le ballon à inversion et l'on y ajoute un dixième d'acide chlorhydrique pur et fumant, jusqu'au trait 55. On chauffe au bain-marie à 68°, en réglant le feu de manière que la durée de l'échauffement soit de dix minutes environ; le ballon est alors retiré et déposé dans un vase rempli d'eau froide, afin de ramener la liqueur aux environs de 15°. Quelquefois il est nécessaire de la filtrer avant de l'introduire dans le tube de 220^{mm}.

Au saccharimètre, l'uniformité de teinte est détruite; pour la ramener, il est nécessaire de tourner le grand bouton de gauche à droite : on relève, comme ci-dessus, la division à laquelle s'arrête l'indicateur, et l'on note de plus le nombre de degrés marqués par le thermomètre du tube.

4° Voici ce qui reste à faire pour obtenir définitivement le titre du sucre essayé : on additionne les deux nombres trouvés avant et après l'inversion, et l'on cherche dans la Table de Clerget, sous le chiffre correspondant à la température de la liqueur dans la seconde opération, le nombre le plus voisin de cette somme; on suit alors la ligne horizontale et l'on trouve dans la colonne A le titre du sucre cristallisable, et, dans la colonne B, le nombre de grammes contenus par litre dans la solution étudiée.

Si le produit ne renfermait que du sucre cristallisable, on

:rouverait le titre déterminé précédemment par lecture ·ecte. Les deux dernières colonnes ont donc le caractère ıne Table spéciale pour les liquides non soumis à l'acidu- .ion.

Table de Clerget.

SOMME DES DEUX NOTATIONS.			TITRES.	
12°.	15°.	18°.	A. Centièmes.	B. Poids par litre.
1,4	1,4	1,3	1	1,64
2,8	2,7	2,7	2	3,29
4,1	4,1	4,0	3	4,94
5,5	5,5	5,4	4	6,58
6,9	6,8	6,7	5	8,23
8,3	8,2	8,1	6	9,88
9,7	9,5	9,4	7	11,52
11,0	10,9	10,8	8	13,17
12,4	12,3	12,1	9	14,82
13,8	13,6	13,5	10	16,47
15,2	15,0	14,8	11	18,11
16,6	16,4	16,2	12	19,76
17,9	17,7	17,5	13	21,41
19,3	19,1	18,9	14	23,05
20,7	20,5	20,2	15	24,70
22,1	21,8	21,6	16	26,35
23,5	23,2	22,9	17	28,00
24,8	24,6	24,3	18	29,64
26,2	25,9	25,6	19	31,29
27,6	27,3	27,0	20	32,94
29,0	28,7	28,3	21	34,58
30,4	30,0	29,7	22	36,23
31,7	31,4	31,0	23	37,88
33,1	32,8	32,4	24	39,53
34,5	34,1	33,7	25	41,17
35,9	35,5	35,1	26	42,82
37,3	36,8	36,4	27	44,47
38,6	38,2	37,8	28	46,11
40,0	39,6	39,1	29	47,76
41,4	40,9	40,5	30	49,41
42,8	42,3	41,8	31	51,06
44,2	43,7	43,2	32	52,70

Table de Clerget (suite).

SOMME DES DEUX NOTATIONS.			TITRES.	
12°.	15°.	18°.	A. Centièmes.	B. Poids par litre.
45,5	45,0	44,5	33	54,35
46,9	46,4	45,9	34	56,00
48,3	47,8	47,2	35	57,64
49,7	49,1	48,6	36	59,29
51,1	50,5	49,9	37	60,94
52,4	51,9	51,3	38	62,58
53,8	53,2	52,6	39	64,23
55,2	54,6	54,0	40	65,88
56,6	56,0	55,3	41	67,53
58,0	57,3	56,7	42	69,17
59,3	58,7	58,0	43	70,82
60,7	60,1	59,4	44	72,47
62,1	61,4	60,7	4	74,11
63,5	62,8	62,1	[illegible]	75,76
64,9	64,1	63,4	47	77,41
66,2	65,5	64,8	48	79,06
67,6	66,9	66,1	49	80,70
69,0	68,2	67,5	50	82,35
70,4	69,6	68,8	51	84,00
71,8	71,0	70,2	52	85,64
73,1	72,3	71,5	53	87,29
74,5	73,7	72,9	54	88,94
75,9	75,1	74,2	55	90,59
77,3	76,4	75,6	56	92,23
78,7	77,8	76,9	57	93,88
80,0	79,2	78,3	58	95,53
81,4	80,5	79,6	59	97,17
82,8	81,9	81,0	60	98,82
84,2	83,3	82,3	61	100,47
85,6	84,6	83,7	62	102,12
86,9	86,0	85,0	63	103,76
88,3	87,4	86,4	64	105,41
89,7	88,7	87,7	65	107,06
91,1	90,1	89,1	66	108,70
92,5	91,4	90,4	67	110,35
93,8	92,8	91,8	68	112,00
95,2	94,1	93,1	69	113,64

Table de Clerget (suite).

SOMME DES DEUX NOTATIONS.			TITRES.	
12°.	15°.	18°.	A. Centièmes.	B. Poids par litre.
96,6	95,5	94,5	70	115,29
98,0	96,9	95,8	71	116,94
99,4	98,3	97,2	72	118,59
100,7	99,6	98,5	73	120,23
102,1	101,0	99,9	74	121,88
103,5	102,4	101,2	75	123,53
104,9	103,7	102,6	76	125,17
106,3	105,1	103,9	77	126,82
107,6	106,5	105,3	78	128,47
109,0	107,8	106,6	79	130,12
110,4	109,2	108,0	80	131,76
111,8	110,6	109,3	81	133,41
113,2	111,9	110,7	82	135,06
114,5	113,3	112,0	83	136,70
115,9	114,7	113,4	84	138,35
117,3	116,0	114,7	85	140,00
118,7	117,4	116,1	86	141,65
120,1	118,7	117,4	87	143,29
121,4	120,1	118,8	88	144,94
122,8	121,5	120,1	89	146,59
124,2	122,8	121,5	90	148,23
125,6	124,2	122,8	91	149,88
127,0	125,6	124,2	92	151,53
128,3	126,9	125,5	93	153,18
129,7	128,3	126,9	94	154,82
131,1	129,7	128,2	95	156,47
132,5	131,0	129,6	96	158,12
133,9	132,4	130,9	97	159,76
135,2	133,8	132,3	98	161,41
136,6	135,1	133,6	99	163,06
138,0	136,5	135,0	100	164,71

Certains sucres peuvent donner, même après inversion, ne notation placée comme la première sur la gauche du ɔro. Dans ce cas, il faudra prendre, non plus la somme, ıais la différence des deux notations, et opérer avec cette

différence comme on l'aurait fait avec la somme. Il est, en effet, évident qu'elle mesure encore la somme de l'action du sucre cristallisable observée avant l'acidulation et de celle, en sens inverse, du sucre incristallisable qui aura été produit sous l'influence de l'acide.

Résultats.

Soit un sucre qui ait donné dans la première opération une déviation de 95^{div} sur la gauche et dans la seconde, à 15°, une déviation de 35^{div} sur la droite.

Somme de l'inversion = 130.

Le chiffre le plus voisin de celui-ci dans la colonne 15 est 129,7, auquel correspondent, dans la colonne A, 95 pour 100 et, dans la colonne B, $156^{gr},47$ par litre. Le sucre proposé était donc entièrement cristallisable.

Supposons, au contraire, que nous ayons trouvé les notations 80 et 22 sur la gauche :

Différence de l'inversion = 58
A 15°, A = 43 pour 100
» B = $70^{gr},82$

XCII^{e} MANIPULATION.

USAGE DES SACCHARIMÈTRES A PÉNOMBRE.

Théorie.

Les saccharimètres à pénombre ne présentent plus de teintes différentes à comparer, comme le saccharimètre Soleil, mais toute l'observation se borne à constater l'égalité de deux intensités d'une seule et même couleur : ils conviennent à tous

les yeux et jouissent, d'autre part, d'une grande sensibilité, car les variations d'intensité de deux plages juxtaposées sont très rapides pour de petits déplacements angulaires de l'analyseur. Les indications de ces instruments sont, sans contredit, plus précises que celles du saccharimètre Soleil : quand on les applique à la détermination des pouvoirs rotatoires, les lectures d'un même angle diffèrent rarement de plus de $1'$.

Il existe deux types d'instruments à pénombre : celui de M. Cornu, construit par M. Duboscq, et celui de M. Laurent.

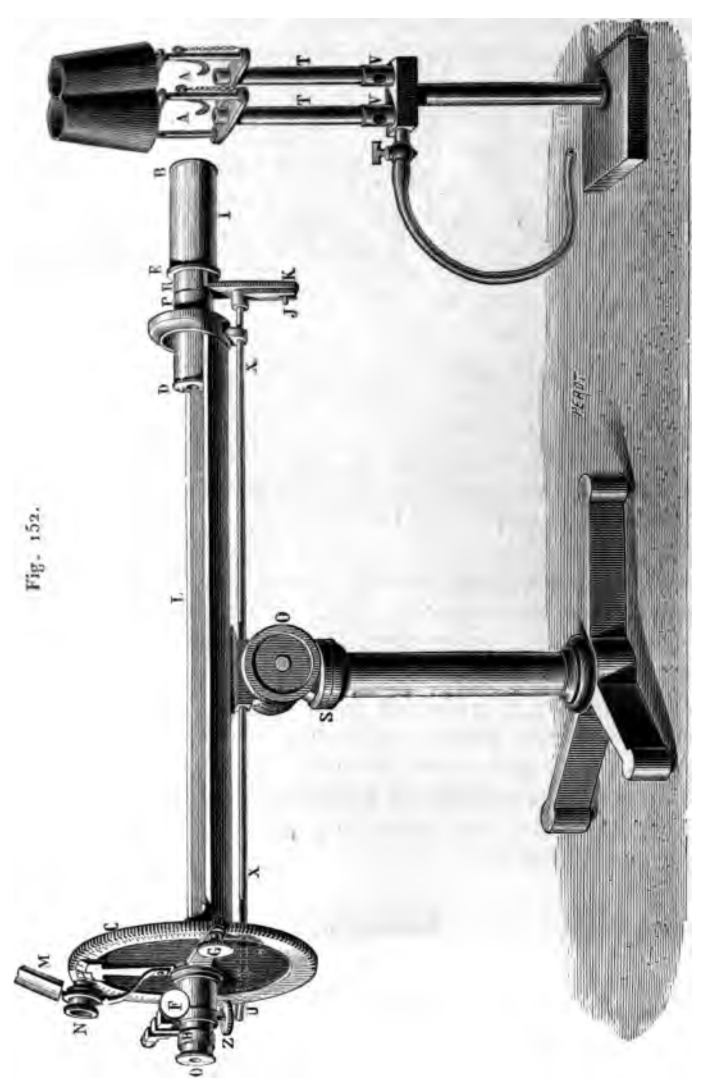
Le premier est fondé sur l'emploi du nicol coupé de M. Jellett; les sections principales des deux moitiés du prisme sont à 5° l'une de l'autre; l'extinction n'a donc plus lieu en même temps pour les deux moitiés de ce prisme, qu'il joue le rôle de polariseur ou d'analyseur; mais il existe une position intermédiaire pour laquelle elles présentent des intensités égales. Cette position correspond au cas où la section principale de l'analyseur ou du polariseur est perpendiculaire au plan bissecteur des deux sections principales; elle constitue le repère de l'instrument,

Dans l'appareil Laurent, le rayon primitivement polarisé traverse un diaphragme circulaire, dont une des moitiés est recouverte par une lame de quartz ou de gypse demi-onde parallèle à l'axe; l'arête parallèle à la section principale faisant un angle déterminé avec le plan de polarisation primitif, les rayons émanés des deux moitiés du disque sont polarisés dans des plans symétriques par rapport à l'arête. Les deux plages auront des intensités égales, toutes les fois que la section principale de l'analyseur coïncidera avec le plan bissecteur des deux plans de polarisation. Le repère est analogue au précédent.

Description.

Les polarimètres à pénombre des divers constructeurs ne diffèrent guère entre eux; les *fig.* 152 et 153 représentent la disposition d'ensemble des deux modèles les plus répandus et le lecteur pourra se rendre compte des détails de leur construction par la coupe de la *fig.* 154; les mêmes lettres se correspondent dans les deux derniers dessins.

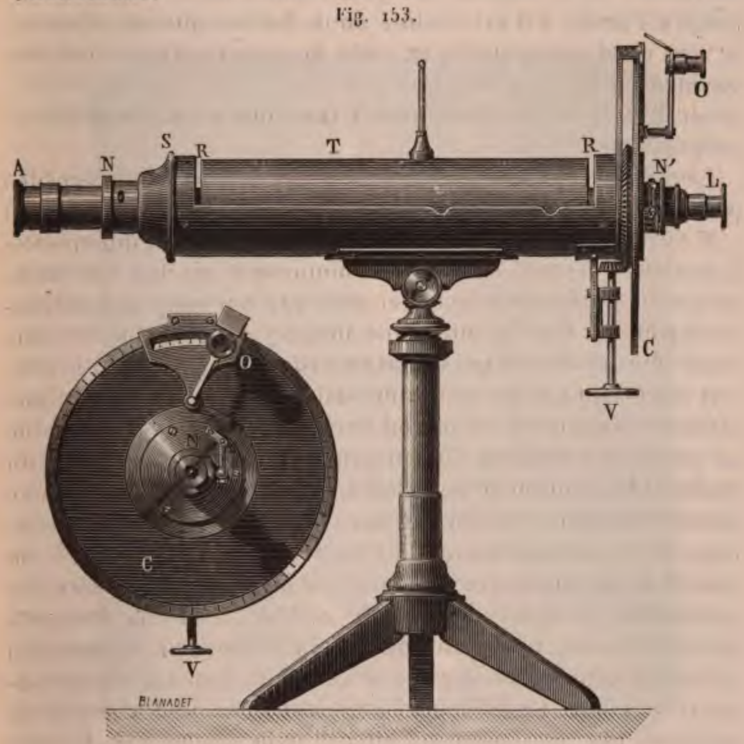
A (*fig.* 154) est une lame de bichromate de potasse, destinée à purifier la lumière jaune des radiations qui l'accompagnent;


Fig. 152.

S représente le diaphragme de l'appareil Laurent; dans l'appareil Duboscq, le nicol coupé joue le rôle d'analyseur et il

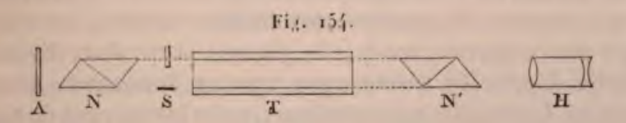
est placé en N′. N est un prisme biréfringent ou un nicol; H représente la lunette de Galilée par laquelle on observe le phénomène.

Fig. 153.



M. Laurent a eu l'ingénieuse idée de rendre variable à volonté l'angle des sections principales de chacune des moitiés

Fig. 154.



du diaphragme; pour atteindre ce résultat, il a suffi de rendre le polariseur mobile, le quartz restant fixe. Un petit levier, qui est représenté en UJK sur la figure 152, permet très sim-

plement de faire tourner le premier nicol sur lui-même; on peut donc rendre de la lumière, suivant les besoins de l'observation. Si le liquide est peu coloré, le levier est levé jusqu'à l'arrêt; s'il est coloré, on le baisse plus ou moins; le zéro n'est pas déplacé par cette manœuvre. Toutes les déterminations se font dès lors dans des conditions d'éclairement identiques, quelle que soit la coloration de la solution proposée.

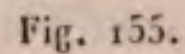
Les tubes T sont identiques à ceux que nous avons décrits précédemment.

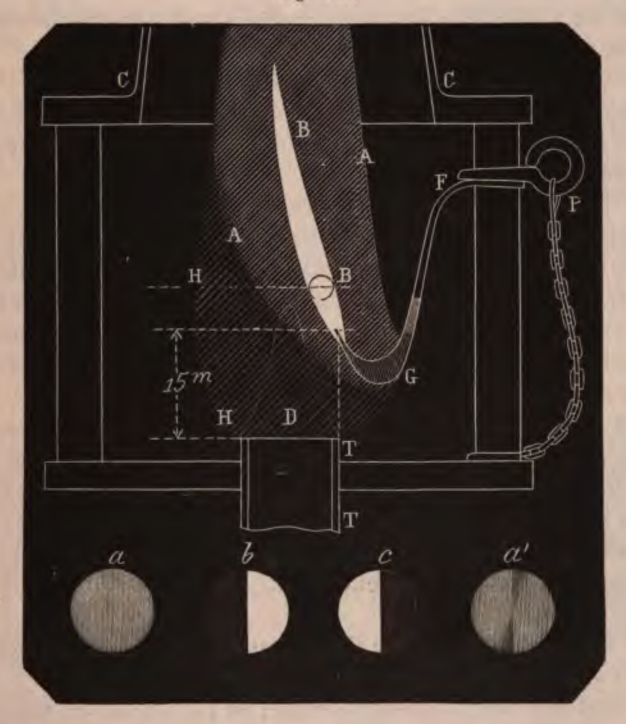
Il convient d'employer un brûleur très intense, à lumière bien homogène ([1]); le double brûleur Laurent réalise tout ce qu'il est possible d'exiger. Il est vrai que la flamme est quelquefois vacillante et que le feu se communique au bec inférieur, mais on atténue ces inconvénients par quelques précautions fort simples. En réglant, à une longueur convenable, le cône intérieur verdâtre D qui se voit au milieu de la flamme (*fig.* 155), on atteint sans peine un régime stable, auquel correspond une flamme lumineuse et immobile; un tâtonnement préalable devra faire connaître l'ouverture du robinet, la hauteur du cône et la position de la cuiller à sel G, qui correspondent à ce fonctionnement régulier. Le bord de cette cuiller doit être situé sur le prolongement du tube et à $0^m,015$ au-dessus : on aurait beaucoup moins de lumière si on l'amenait au cœur de la flamme. C'est vers le point B qu'il faut viser : la flamme y est très étroite, mais extrêmement brillante. Plus la pression est forte, plus la lumière est intense et la flamme fixe. Il convient de placer les brûleurs à $0^m,200$ environ de l'extrémité du polarimètre : on n'a de la sorte à craindre ni échauffement ni projection de sel fondu.

Les saccharimètres à pénombre permettent de déterminer fort exactement les pouvoirs rotatoires spécifiques; aussi faut-il exiger des constructeurs que le plateau porte deux divisions, l'une en degrés du cercle avec vernier donnant la minute, l'autre en degrés saccharimétriques, pour les titrages de sucre. M. Laurent a même construit des instruments, dans lesquels

([1]) L'étude des lampes monochromatiques a déjà été faite ci-dessus, LXXVII[e] manipulation, p. 378.

le polariseur glisse sur une règle, de manière à permettre d'employer des tubes de diverses longueurs allant jusqu'à


Fig. 155.



500mm; cette disposition est très recommandable pour les recherches de précision.

Manuel opératoire.

1° Le brûleur étant réglé et l'appareil dirigé vers la flamme, l'opérateur modifie le tirage de la loupe O (*fig.* 153) jusqu'à ce qu'il voie nettement les divisions, qui se trouvent alors éclairées par un réflecteur renvoyant sur elles la lumière du brûleur.

2° Le tube est rempli d'eau distillée et placé sur l'appareil;

puis, en tournant le bouton moleté V, on amène le zéro du vernier à 1° ou 2° du zéro du cercle, de manière qu'une moitié du disque soit jaune clair, l'autre noir jaunâtre; il est très facile, dans ces conditions, de mettre au point. La ligne de séparation des deux moitiés doit être parfaitement nette.

3° On cherche une seconde fois à diriger l'instrument vers le brûleur, en ayant soin de s'assurer le maximum de lumière, car c'est une condition essentielle à la précision des déterminations.

4° Le zéro doit être réglé avec soin; il faut que, pour cette position, les deux parties du disque paraissent d'un gris jaunâtre sombre absolument identique. L'égalité de tons s'obtient par le jeu d'une vis de correction N' : tant que l'appareil n'est pas réglé, on a les apparences *b* ou *c* (*fig.* 155); on tourne dans le bon sens quand le côté foncé s'éclaircit et que le côté clair s'assombrit.

On s'assure d'un bon réglage en cherchant l'égalité sans regarder le vernier; l'alidade fixée, on procède seulement à la lecture, qui ne doit pas comporter d'erreur supérieure à quelques minutes et conduire à zéro par une moyenne de dix observations. J'ai pris l'habitude de faire ces essais avant chaque opération, car l'œil ainsi exercé acquiert une rectitude de jugement remarquable.

5° On remplace le tube d'eau distillée par un autre rempli de la solution à étudier.

L'égalité d'intensité est détruite; on la rétablit en tournant le bouton V dans un sens tel que le côté moins lumineux continue à devenir foncé jusqu'au noir, puis s'éclaircisse au même degré que l'autre moitié. Si le vernier a tourné à droite à partir du zéro, le pouvoir rotatoire est droit.

6° M. Laurent fait remarquer dans sa Notice que, si l'on veut faire vérifier un résultat par un autre opérateur, il convient que ce dernier refasse lui-même toutes les manipulations préparatoires. J'insiste sur cette recommandation, qui est de la plus haute importance.

La plus grosse difficulté de cette expérience résulte des inégalités de ton qu'on observe souvent dans les diverses parties des demi-disques, par suite de l'hétérogénéité de la radiation :

le pointé devient dès lors incertain. Voici comment le constructeur corrige cet inconvénient; il invite l'opérateur à fixer la ligne de séparation au centre des demi-disques, et à faire tourner le bouton alternativement dans un sens ou dans l'autre, lorsqu'on est près de l'égalité des teintes, en réduisant de plus en plus l'amplitude des oscillations. On a alors l'apparence d'une petite ombre qui semble aller et venir de chaque côté de cette ligne. On s'arrête lorsqu'elle semble stationnaire et que cette ligne même, qui paraissait se courber ou s'incliner successivement dans les deux sens, reste droite et immobile; on arrive même à la faire disparaître. Dans toute cette recherche, on n'a pas quitté l'instrument de l'œil; en recommençant après un instant de repos, on peut atteindre une précision remarquable.

Résultats.

S'il faut en croire les constructeurs, les saccharimètres à pénombre seraient quatre fois plus précis que l'instrument de Soleil : cette affirmation est peut-être un peu trop absolue, et l'on désirerait la voir appuyée sur des chiffres. Cependant il faut reconnaitre la supériorité de ces instruments.

Une plaque de quartz perpendiculaire à l'axe, d'une épaisseur de $0^m,01$, doit marquer 100°, quand on relève la division en centièmes de sucre, et 21°,67 ou 21°41′ quand on évalue la rotation en degrés. Elle correspond à une prise d'essai de $16^{gr},200$, et non plus de $16^{gr},471$ comme précédemment.

On emploie le tube de $0^m,20$ et celui de $0^m,22$, s'il a été nécessaire de traiter la solution par $\frac{1}{10}$ de sous-acétate de plomb; la quantité de sucre peut être calculée directement par une règle de trois : une division correspond à $0^{gr},0162$ pour 100^{cc}. M. Pellet a publié un Barême qui donne les calculs faits jusqu'à 1250 divisions.

Quand le liquide a été interverti, on consulte, comme ci-dessus, les Tables de Clerget, en tenant compte toutefois de la légère différence des points de départ. La formule suivante suffit du reste dans la plupart des cas : P représente le pouvoir rotatoire, A la somme ou la différence des nombres lus

sur l'échelle saccharimétrique avant et après inversion, et T la température du liquide au moment de l'essai.

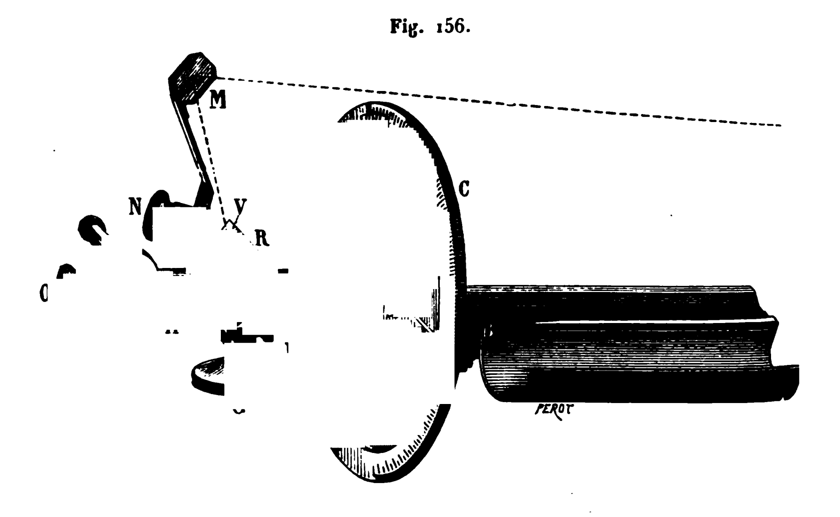
$$P = \frac{200.A}{288 - T}$$

On peut encore écrire :

$$P\ 1,62 = \text{sucre par litre}\ (^1).$$

(1) M. Laurent a présenté, le 19 mai 1882, à la *Société française de Physique*, un nouveau saccharimètre, modifié de manière à pouvoir être employé avec une lumière blanche ordinaire : ce résultat intéressant a été obtenu par l'interposition d'un compensateur Soleil, à lames prismatiques de quartz, entre l'analyseur et le cadran ; au lieu d'agir par rotation, on mesure par compensation. Cette modification présente de grands avantages pour les usages indus-

Fig. 156.



triels, et j'ai cru devoir la signaler ici, bien que le polarimètre à lumière jaune ne paraisse pas devoir être détrôné pour les études purement physiques

Le compensateur complet (*fig.* 156) est agencé de façon à pouvoir s'adapter facilement aux polarimètres anciens : on peut donc avoir à volonté et instantanément un polarimètre à lumière monochromatique ou un saccharimètre à lumière ordinaire. L'appareil reste toujours à pénombre ; il n'y a pas à se préoccuper de teinte sensible.

La manipulation de l'instrument reste la même : on met le zéro du vernier V en face du zéro de la règle R et l'on établit l'égalité de tons au moyen du bouton F ;

XCIII[e] MANIPULATION.

USAGE DU POLARISTROBOMÈTRE.

Théorie.

Quels que soient les avantages des saccharimètres à pénombre, ils ne sont pas néanmoins à l'abri de toute critique, parce qu'ils exigent une source de lumière absolument monochromatique, à défaut de laquelle on ne réalise pas l'uniformité de nuance de chaque plage; l'égalisation des éclairements est dès lors assez incertaine.

M. Wild a choisi pour repère les franges d'interférence de Savart, qui se produisent très nettement en lumière blanche et constituent par leur apparition et leur disparition un signe également visible pour tous les yeux. Deux nicols N et N' (*fig.* 157) sont les organes essentiels de l'instrument; S est l'organe sensible. C'est un polariscope de Savart, formé de deux lames épaisses de quartz, taillées à 45° de l'axe et croisées à angle droit.

---

la plaque du bichromate donne une lumière suffisamment monochromatique pour masquer complètement la petite coloration introduite dans la lumière par la lame demi-onde.

La division de la règle R et le vernier V sont éclairés très vivement par le bec lui-même à l'aide du miroir M, mobile avec le vernier. La lampe N permet de lire le $\frac{1}{10}$ de division : la précision est donc presque doublée. Mais le travail des quartz du compensateur doit être parfait.

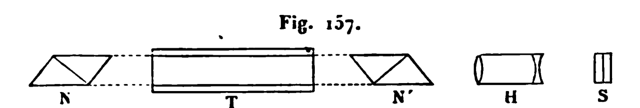
Pour définir rigoureusement la division de la règle, M. Laurent détermine d'abord très exactement le zéro, puis le point 100, avec une lame de quartz type parfaitement étalonnée. Malgré cela, le compensateur peut encore donner une lecture erronée vers la division 50. Pour y obvier, on peut opérer comme il suit :

1° Si la déviation va de 25 à 75 sur la division en centièmes de sucre, régler l'appareil non à 0, mais à 50 avec une plaque de quartz type étalonnée 50.

2° Si la déviation est comprise entre 75 et 100, régler à 100 avec une plaque type étalonnée 100.

Or, toutes les fois que les sections principales des deux nicols sont parallèles ou perpendiculaires, les franges manquent dans la partie centrale de l'image; elles redeviennent au con-

Fig. 157.



traire visibles dès que les deux sections sont dans des positions relatives différentes, et leur éclat est maximum lorsque les sections principales sont à 45° l'une de l'autre.

En lumière blanche, l'observation est possible, mais elle gagne en netteté quand la lumière est simple.

Être ou ne pas être est certainement un repère d'une grande précision ; malheureusement l'œil se fatigue à considérer ces franges si fines et, par suite sans doute de la persistance des impressions sur la rétine, il croit les voir encore alors qu'elles ont déjà disparu. Aussi l'usage du polaristrobomètre ne s'est-il pas généralisé, autant que quelques-uns le prédisaient.

Description.

La disposition d'ensemble du polaristrobomètre est représentée par la *fig.* 158.

M. Wild a rendu mobile le nicol polariseur; au moyen d'un bouton qui se trouve à sa droite, l'observateur fait tourner un pignon commandant la roue dentée N. Le vernier M' marque les déplacements angulaires du polariseur, et la lunette M permet de lire les angles sans quitter l'oculaire : un petit bec de gaz fixé sur l'instrument ou une bougie éclaire le limbe gradué.

L'une des moitiés du disque présente une division marquée en grammes, allant de 0 à 300 à droite et de 0 à 150 à gauche: chaque intervalle correspond à 1^{gr} de sucre pur contenu dans 1^{lit} de solution, si l'on emploie un tube de 200^{mm}. Sur le côté opposé du disque se trouve une division en degrés du cercle, donnant le $\frac{1}{5}$ de degré directement et le $\frac{1}{60}$ par le vernier; elle permet d'employer cet instrument à la détermination des pouvoirs rotatoires.

Tel est le polaristrobomètre construit par MM. Hermann et Pfister à Berne.

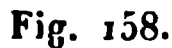
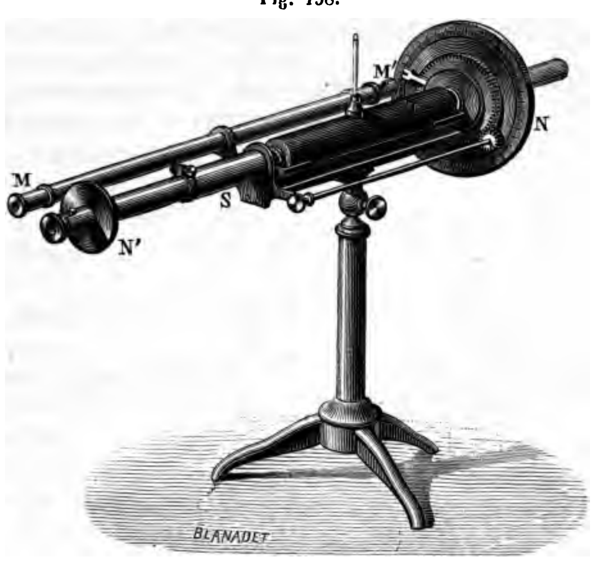


Fig. 158.



La lampe monochromatique et les tubes sont identiques à ceux que nous avons décrits précédemment.

Manuel opératoire.

1° Il ne faut pas commencer les observations avant d'avoir une lumière suffisamment forte et bien homogène.

L'opérateur règle le tirage de l'oculaire de manière à rendre visible la croisée de fils; il constate que le limbe est suffisamment éclairé et que la lunette d'approche permet de lire distinctement la division. Cela fait, il amène le trait 300 de la division en grammes dans le champ de vision de la lunette : il doit voir sur un fond jaune clair une série de raies noires horizontales, d'autant plus distinctes que l'image des fils est plus nette.

2° Tournant alors le bouton placé à sa droite, il fait disparaître les raies : au moment précis de la disparition, le zéro du

vernier doit être arrêté au zéro du limbe gradué. Les vis de correction S permettent de réaliser exactement cette condition.

Dans cette expérience, il est absolument nécessaire de relever la position précise qui correspond à l'évanouissement des stries : on doit choisir le premier moment de leur disparition et ne pas s'inquiéter de la petite durée pendant laquelle il semble qu'on ne voie plus rien. Quand on travaille dans une grande obscurité, cet intervalle est d'ailleurs infiniment petit : l'observateur aura soin de se rafraîchir fréquemment le regard en jetant les yeux sur les objets qui l'entourent ; il lui arrivera souvent de réformer ainsi un premier jugement par une seconde observation.

3° Interposons le liquide actif : les franges reparaissent et il faut tourner le polariseur d'un angle α pour les éteindre de nouveau. Il convient de fonder une détermination sur une moyenne de plusieurs observations.

La disparition des raies a lieu quatre fois sur toute l'étendue du disque ; dans la pratique ordinaire, on se contente de relever l'angle de rotation dans le premier quadrant. Mais, pour une observation délicate, on détermine le zéro et l'on mesure un pouvoir rotatoire par quatre lectures, en faisant disparaître quatre fois les franges par un déplacement continu du polariseur : on fait la moyenne des nombres relevés. Or, les différences des angles lus ne sont pas rigoureusement de 90° ; mais, en prenant la moyenne des quatre valeurs trouvées dans les quatre quadrants, on corrige les erreurs de graduation et de division de l'instrument et l'on atteint une précision remarquable.

La prise d'essai pour un dosage saccharimétrique est réglementairement de 10^{gr} pour 100^{cc}, soit de 100^{gr} par litre : si, au lieu de 10^{gr}, on prend 20^{gr} ou 30^{gr}, et qu'on en fasse encore une dissolution dans 100^{cc}, on obtiendra sur le cercle divisé les chiffres correspondants de 200 et 300.

Résultats.

Avec un peu d'habitude on atteint une précision de $\frac{1}{2}$ pour 100.

Il est d'usage de dissoudre 20gr de sucre par 100cc : chaque trait du cercle divisé répond à $\frac{1}{2}$ pour 100 de sucre pur contenu dans le produit étudié.

L'inversion se fait exactement comme pour les autres saccharimètres.

Supposons que l'opération directe ait donné 187,8 dans le tube de 200mm et l'opération inverse 49,6 dans le tube de 220mm à 18°: la Table suivante donnera le titre vrai de la solution.

TEMPÉRATURE.	ANGLES DE ROTATION								
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
10°......	0,719	1,438	2,157	2,876	3,595	4,314	5,033	5,572	6,471
12......	0,725	1,449	2,175	2,898	3,624	4,350	5,073	5,696	6,522
15......	0,733	1,465	2,199	2,930	3,664	4,398	5,129	5,860	6,594
18......	0,740	1,480	2,220	2,960	3,700	4,440	5,180	5,920	6,660

Somme..... $187,8 + 49,6 = 237,4$

Pour 2 centaines, nous écrirons...........	148,00
» 3 dizaines..........................	22,20
» 7 unités...........................	5,18
» 4 dixièmes.........................	0,29
Total................	175,67

Si la solution avait été normale, la liqueur contiendrait d'après ce résultat 175gr,67 de sucre par litre; mais, comme nous avons pris 20gr pour 100cc, il faut diviser la somme ci-dessus par deux, pour obtenir le pour 100 de sucre contenu dans le liquide examiné, soit 87,835 pour 100 [1].

Quand on applique le polaristrobomètre à la détermination des pouvoirs rotatoires, on lit les angles sur l'échelle des degrés de cercle. Lorsque l'amplitude de la rotation ne dépasse pas 2° ou que le liquide est fortement coloré, il vaut mieux opérer en lumière blanche qu'en lumière jaune.

[1] *Du Polaristrobomètre*, par le professeur Wild; Berne, 1868.

La substance est dextrogyre, quand on doit tourner vers les chiffres croissants pour obtenir la disparition des raies.

Il peut exister, en certains cas, de l'incertitude sur le sens de la rotation. Ainsi, supposons que le point de départ ait été à 50° et que l'observation fasse relever un angle de 92° : on aurait tort de déclarer immédiatement que le liquide a une rotation droite de 42° pour 200mm de longueur. En effet, avec la disposition de l'instrument, on pourrait conclure aussi bien à une rotation gauche de 48°, car à 2° les raies disparaîtraient encore. Pour sortir de doute, en ce cas, très rare d'ailleurs, il faut procéder à un nouvel examen dans un tube de 100mm. On trouvera 71 si le liquide est droit et 26 s'il est gauche ([1]).

([1]) *Pratique du Polaristrobomètre*, Berne, Wyss, 1872, sans nom d'auteur.

CHAPITRE XVIII.

ACOUSTIQUE.

XCIV^e MANIPULATION.

MESURE DE LA HAUTEUR D'UN SON PAR LA SIRÈNE.

Théorie.

La hauteur d'un son dépend uniquement de la durée de la vibration qui lui donne naissance ou bien, ce qui revient au même, du nombre de vibrations effectuées par seconde.

La hauteur des sons est d'autant plus grande que le nombre des vibrations est plus considérable.

Il est assez difficile de déterminer exactement le nombre de vibrations exécutées par seconde par les corps élastiques qui donnent des sons perceptibles : les physiciens ont cependant imaginé plusieurs méthodes, parmi lesquelles nous choisissons celle de la sirène : elle exige que l'observateur ait de l'oreille, mais nous lui trouvons sur les méthodes graphiques l'avantage d'être plus facilement applicable dans les laboratoires, avec les ressources ordinaires d'un cabinet de Physique.

Rappelons, pour mémoire, la valeur des intervalles de la gamme :

ut,	*ré*,	*mi*,	*fa*,	*sol*,	*la*,	*si*,	*ut*.
1,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{5}{4}$,	$\frac{4}{3}$,	$\frac{3}{2}$,	$\frac{5}{3}$,	$\frac{15}{8}$,	2.

Les intervalles que l'oreille apprécie avec le plus de facilité

sont désignés sous le nom d'octave, quinte, quarte, tierce majeure et mineure, et ils correspondent aux rapports simples

$$2,\ \frac{3}{2},\ \frac{4}{3},\ \frac{5}{4}\ \text{et}\ \frac{6}{5}.$$

L'Académie des Sciences a adopté le nombre de 875 vibrations simples pour le diapason officiel donnant le la_3; le diapason allemand correspond à 880 vibrations et le diapason anglais à 888 ([1]). M. Kœnig a pris pour point de départ, dans la construction de ses instruments, le diapason $ut_3 = 512$ vibrations de Chladni, qui a l'avantage de donner pour chaque *ut* des nombres qui sont des puissances de 2; ce diapason a été longtemps adopté dans les cabinets de Physique, quoiqu'il fût un peu plus bas que les diapasons des musiciens.

Description.

Le lecteur me dispensera de décrire dans ses détails la sirène classique.

Nous emploierons la sirène polyphone de Dove, modifiée par M. Helmholtz : elle diffère de celle de Cagniard de Latour en ce que le plateau est percé de plusieurs séries de trous disposés sur des circonférences concentriques; c'est de plus une sirène double. A et B (*fig.* 158) sont les porte-vent, CD est le compteur; les clefs α et β correspondent chacune à une série de trous percés dans le plancher de la chambre d'air. Le disque inférieur présente quatre séries de 8, 10, 12 et 18 trous, le disque supérieur quatre autres de 9, 12, 15 et 16. Par conséquent, si ut_0 est le son de huit trous, la sirène donnera pour une même vitesse de rotation, ut_0, mi_0, sol_0, $ré_1$ et $ré_0$, sol_0, si_0, ut_1, et elle permettra de produire l'*unisson*, sol_0, sol_0, les *octaves* ut_0, ut_1 et $ré_0$, $ré_1$, les *quintes* ut_0, sol_0 et sol_0, $ré_0$, les *quartes* $ré_0$, sol_0 et sol_0, ut_1, et plusieurs tierces.

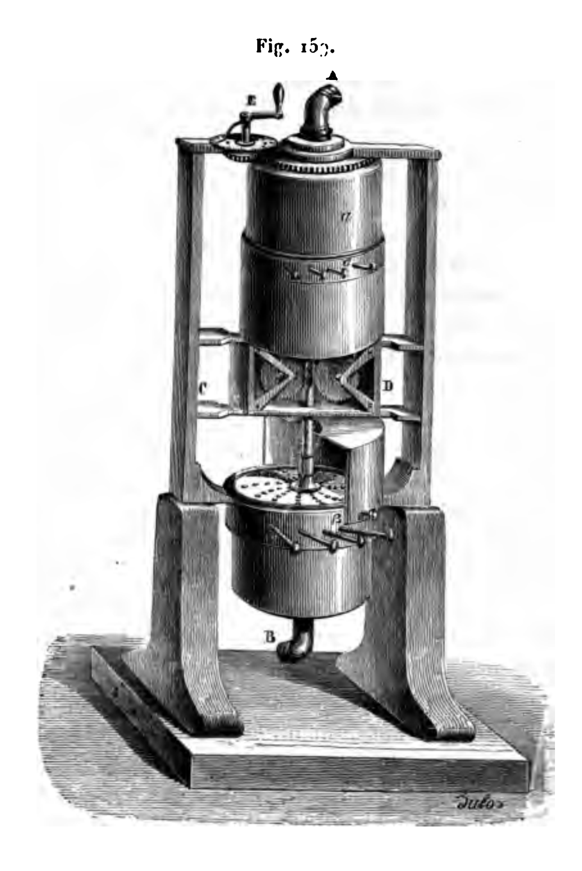
Il résulte de l'emploi de cette sirène une plus grande facilité d'appréciation des sons; de plus, ses dimensions considé-

---

(1) Il y aurait de sérieux avantages à dire 437,5, 440 et 444 vibrations doubles; mais on emploie généralement encore l'ancienne manière de compter.

rables et sa masse permettent d'entretenir quelque temps le même mouvement vibratoire; c'est pourquoi nous en ferons usage dans cette manipulation, bien qu'en réalité M. Helmholtz l'ait disposée uniquement pour l'étude des interférences.

Fig. 159.



Quand on veut déterminer le nombre de vibrations d'un son, on peut le produire au moyen d'un tuyau d'orgue, d'un diapason ou de tout autre instrument; mais il est nécessaire que le son soit bien net et qu'on puisse le prolonger ou le répéter fréquemment.

Pour réaliser une bonne expérience avec la sirène, il faut disposer d'une soufflerie excellente : le meilleur modèle est

celui de M. Cavaillé-Coll. Le soufflet a près de 1^m de longueur et $0^m,50$ de largeur; il donne le vent avec une égalité parfaite et peut résister à de fortes pressions, qui sont mesurées par un manomètre spécial; en y adjoignant un régulateur du vent à soufflet auxiliaire et contrepoids, on peut maintenir un régime permanent pendant toute la durée de l'expérience. Ce modèle est construit par M. Kœnig; il défie la critique, mais ne convient guère aux petits budgets. Généralement, les souffleries qu'on rencontre dans les laboratoires sont insuffisantes, souvent elles sont mal conditionnées; les expériences avec la sirène deviennent dès lors difficiles, mais non impossibles; en effet, Cagniard de Latour faisait marcher son instrument avec la bouche, et il paraît qu'il était parvenu à évaluer en quelques secondes la qualité d'un son par ce procédé.

La plus grosse difficulté de l'opération que nous allons entreprendre consiste à entretenir un son déterminé sans qu'il s'élève; Cagniard de Latour s'aidait, dans ses grandes expériences, d'un régulateur à ailettes monté sur l'axe du plateau ([1]); M. Helmholtz a eu recours à un moteur électromagnétique, dans lequel le courant était interrompu par la force centrifuge d'un poids, dès que la vitesse de rotation dépassait une valeur déterminée. M. Bourbouze construit une sirène à régulateur électromagnétique qui donne d'excellents résultats : à l'aide d'un pignon B à double crémaillère (*fig.* 160), on approche ou l'on éloigne simultanément les électro-aimants E d'un disque de cuivre rouge D qui est monté sur l'axe de la sirène. L'appareil est muni d'un compteur qui indique le nombre de tours effectués dans un temps déterminé. Au moyen du soufflet on lance et l'on maintient un courant d'air capable de donner naissance à un son supérieur à celui que l'on veut mesurer; puis on rapproche les électro-aimants jusqu'à ce que l'unisson soit obtenu. M. Bourbouze a pu ramener le son de 8162 vibrations par seconde à 128 vibrations, en passant par toutes les notes intermédiaires avec la même pression.

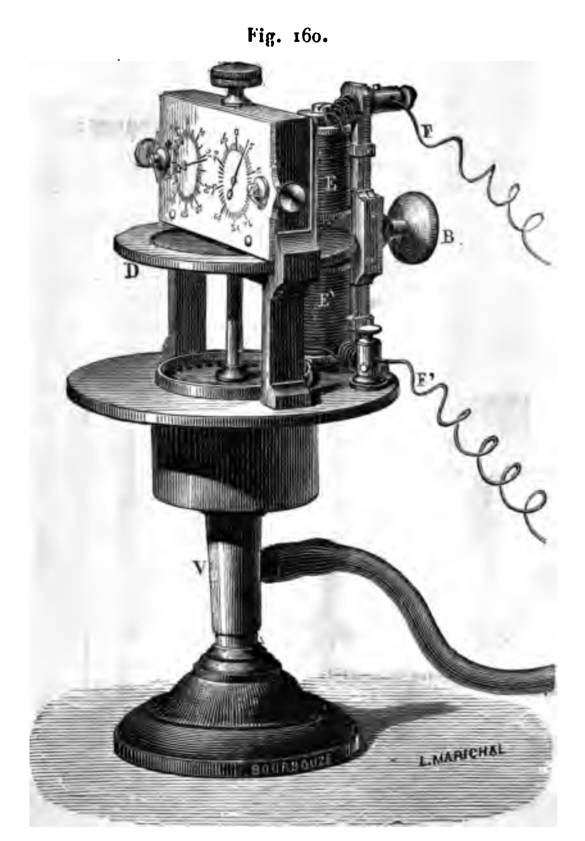
Grâce à ces dernières dispositions, la sirène donne des sons d'une hauteur extraordinairement constante, à tel point qu'elle peut rivaliser sous ce rapport avec les tuyaux d'orgue

---

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, XII, p. 167; 1819.

les mieux construits ([1]); mais ce sont des appareils spéciaux, qui diffèrent beaucoup de ceux qu'on manie dans la plupart des laboratoires; je n'en ai fait mention que pour attirer l'attention du lecteur sur cette élévation graduelle du

Fig. 160.

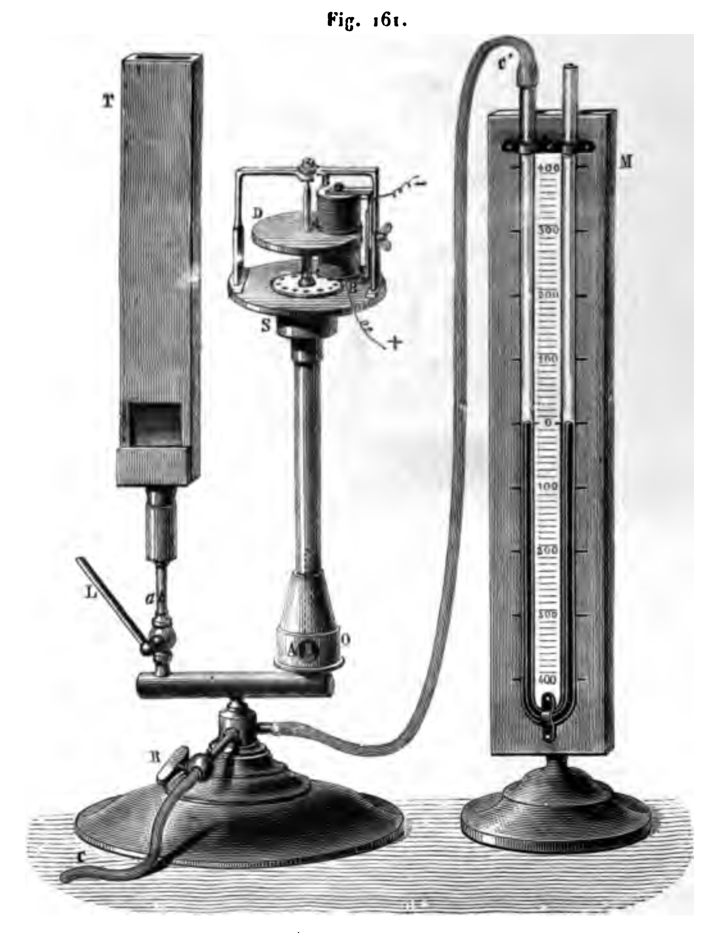


son, qu'il est presque impossible d'éviter avec la sirène, à moins qu'un réglage habile de la pression n'établisse un équilibre parfait entre l'impulsion constante du vent et les résistances de l'instrument.

([1]) H. Helmholtz, *Théorie physiologique de la Musique*, traduction Guéroult, p. 18; 1874.

Pour évaluer les vibrations des sons très élevés, Cagniard de Latour enroulait un ruban sur l'arbre, de même qu'on enroule une ficelle sur le pivot d'une toupie, et il déterminait

Fig. 161.



une rotation rapide par une traction énergique; le vent de la soufflerie permet d'entretenir quelque temps ce mouvement et il devient possible d'estimer assez exactement des sons extrêmement aigus.

La disposition d'ensemble représentée par la *fig.* 160 con

vient très bien à cette manipulation : j'en ai emprunté l'idée et le dessin à M. Bourbouze.

Manuel opératoire.

1° Les aiguilles des deux cadrans du compteur sont ramenées au zéro et l'on débraye le mouvement.

2° On donne le vent, de manière à faire chanter la sirène à l'unisson du son qu'on veut étudier. Par tâtonnement, l'opérateur cherche la pression nécessaire pour tenir ce son; il est rare qu'on réussisse entièrement, car le son a une tendance à monter toujours; mais, en appuyant doucement le doigt sur l'axe du plateau tournant, on arrive à maintenir l'unisson. Ce moyen peut être recommandé; la résistance créée par la pression du doigt remplace le régulateur à ailettes de Cagniard de Latour ou le frein électromagnétique de M. Bourbouze. Avec ces instruments, l'opération est fort aisée.

3° A un signal donné, un aide embraye le mouvement en même temps qu'il met en marche un chronomètre à secondes indépendantes. Il arrête les deux instruments dès que le son varie.

4° Supposons que nous fassions usage des 10 trous et que la sirène ait effectué 800 tours en vingt secondes; il y aura eu en tout 8000 oscillations doubles ou 16000 oscillations simples, soit 400 ou 800 par seconde.

Résultats.

Le procédé de la sirène comporte certaines causes d'erreur qu'il importe de signaler.

Et d'abord, le mouvement des aiguilles n'indique pas les fractions de tour de l'arbre; par suite, il y a incertitude sur le nombre exact des vibrations.

De plus, au moment où l'on engrène, il se produit toujours une perturbation au mouvement de rotation.

Enfin, il est difficile d'admettre que le chronomètre marque rigoureusement le temps pendant lequel le compteur enre-

gistre les tours, car la pression sur les deux boutons ne peut être absolument simultanée. Le seul moyen d'atténuer l'influence de ces causes d'erreur est de prolonger le plus possible la durée de l'expérience. Cagniard de Latour n'opérait que pendant quatre secondes sur une sirène à quatre trous; mais nous estimons que vingt secondes est un minimum.

Les élèves exerceront d'abord leur oreille, en faisant parler les deux sirènes de manière à produire l'octave, la quinte et les autres intervalles consonants.

Puis ils pourront évaluer les harmoniques rendus par un tuyau ouvert; ils constateront qu'ils se suivent comme la série des nombres 1, 2, 3, 4, ..., ou bien ut_1, ut_2, sol_2, ut_3, mi_3, sol_3, etc.

Enfin ils vérifieront qu'un tuyau fermé donne la même note fondamentale qu'un tuyau ouvert de longueur double.

Ces premières études faites, on leur proposera de déterminer les nombres de vibrations de tout corps sonore, que ce soit un tuyau d'orgue, une corde ou une anche; M. Tyndall ne croit pas impossible de conclure du bourdonnement d'une mouche combien de fois elle frappe l'air de ses ailes.

XCV^e MANIPULATION.

DÉTERMINATION DE LA VITESSE DU SON PAR LA MÉTHODE DE M. KUNDT.

Théorie.

C'est à Chladni qu'est due l'idée de rendre visibles les mouvements vibratoires des corps sonores, en projetant des poudres légères à leur surface; mais nul n'avait songé avant M. Kundt à appliquer les figures acoustiques à la détermination de la vitesse du son. Il a obtenu cet important résultat en fixant les ondes de l'air dans un tube fermé; la grande ré-

gularité des groupements ainsi formés permet de mesurer la longueur de ces ondes ([1]).

La production de concamérations fixes dans l'intérieur d'un tube vibrant longitudinalement ne peut provenir que des extrémités fermées; l'air, comprimé et dilaté alternativement par les surfaces terminales, est obligé de rendre le même son que le tube. Or, les vitesses de propagation du son sont beaucoup plus grandes dans le solide qui forme la paroi que dans l'air qui y est renfermé; les longueurs d'onde diffèrent dans le même rapport, de telle sorte qu'un tuyau dont la longueur totale est d'une demi-onde ([2]) pour le verre peut correspondre à un grand nombre de demi-ondes d'air. Si donc on fait vibrer ce tube en le tenant par son milieu, et que n monticules de sable témoignent de l'existence de n demi-longueurs d'onde dans l'air du tube, on en déduira correctement le rapport des vitesses du son dans l'air et dans le verre; la vitesse sera n fois plus grande dans le verre.

On peut dire encore que le rapport des vitesses est celui des longueurs totales du tube et d'une concamération.

Les figures de M. Kundt peuvent donner de même la vitesse du son dans un gaz quelconque remplissant le tube à la place de l'air. Le nombre des ondes de poussière, dans des tubes identiques remplis de gaz différents, est en raison inverse des vitesses de propagation dans les gaz, et leurs longueurs sont directement proportionnelles à ces vitesses. Prenant pour unité la vitesse dans l'air, on y rapporte celle dans les autres gaz.

En même temps, on peut déterminer la hauteur du son rendu par le tube; connaissant en effet la longueur d'une onde λ dans l'air et la vitesse v de propagation, on calculera le nombre de vibrations par seconde N par la formule

$$v = N\lambda.$$

([1]) *Annales de Poggendorff*, CXXVII, p. 427 (1865), et CXXVIII, p. 337 (1866); *Annales de Chimie et de Physique*, 4[e] série, IX, p. 290 (1866), et XV, p. 487 (1868).

([2]) Nous appelons *demi-onde* ce qui, dans beaucoup de Traités, porte encore le nom d'*onde;* mais nous croyons devoir compter les longueurs comme en Optique.

Enfin, en faisant frapper l'extrémité plane d'une verge vibrant longitudinalement contre l'air d'un espace limité, M. Kundt a réussi à déterminer par le même procédé la vitesse du son dans un corps solide quelconque, ainsi que nous allons le faire voir.

Fig. 162.

Description.

M. Kundt, dans une première série d'expériences, s'est servi de tubes de verre de 1^{m} de long sur 10^{mm} ou 15^{mm} de diamètre, fermés à leurs deux extrémités par scellement ou simplement par des bouchons de liège; il y introduisait du lycopode, du liège pulvérisé ou encore de la silice pulvérulente, obtenue par calcination de la silice gélatineuse. Il ne faut pas que ces poussières soient en trop grande masse, car elles diminueraient sensiblement la vitesse du son. Ces tubes se prêtent bien à la démonstration des phénomènes dans un cours; cependant, il convient de les modifier pour les manipulations, suivant le dernier modèle adopté par le savant physicien allemand.

Prenons un tube de verre AA', d'environ $1^{m},50$ de long sur 10^{mm} de diamètre (*fig.* 162) et mastiquons à un tiers de sa longueur, à partir de A, un bouchon D et à son extrémité un piston *h* de 15^{mm} de diamètre; un cylindre de caoutchouc peut remplir cet office; M. Kundt le recouvre d'une lamelle de cuir mince. Ce tube AA' est engagé dans un autre tube de 16^{mm} de diamètre; l'assemblage des deux pièces se fait par le bouchon D, qui est fortement serré par une virole de laiton C, vissée sur le grand tube.

On ferme le tube AB par un couvercle métallique, traversé par une tringle *f*, qui permet de déplacer quelque peu l'obturateur *g*.

(1) En traitant par l'acide chlorhydrique une dissolution de silicate de soude,

C'est dans l'intervalle *hg* que se produit le phénomène à étudier; on y introduit la poudre fine destinée à marquer les longueurs d'onde du gaz mis en vibration par le piston *h*.

Pour produire le mouvement oscillatoire, on frotte la partie extérieure du tube AA' avec un drap mouillé, de manière à le faire vibrer longitudinalement.

Le robinet R permet d'introduire dans la chambre G*h* le gaz sur lequel on veut opérer.

Des pinces semblables à celle de la *fig.* 163 maintiennent horizontalement le grand tube et la verge vibrante : on les fixe sur une table de bois.

Fig. 163.

Le tube AA' peut être remplacé par une tige massive d'une substance quelconque : la seule condition est qu'on puisse la faire vibrer longitudinalement. On peut dès lors déterminer par le même appareil la vitesse du son dans les solides. Pour faire vibrer les solides, on emploie un drap saupoudré de colophane.

Cette manière de produire les figures acoustiques est préférable à celle qui consiste à les faire naître dans le tube même qui rend le son; en effet, Savart a démontré qu'il se forme une ligne nodale en hélice autour des tubes vibrants, par suite de vibrations secondaires transversales qui nuisent à la régularité des concamérations.

Le second dispositif de M. Kundt permet, de plus, la construction d'un appareil double, dans lequel on introduit, d'une part, de l'air, de l'autre, un gaz quelconque ou une vapeur: il suffit de recouvrir l'extrémité du tube ou de la verge AA' d'un second tube semblable à AB.

Manuel opératoire.

1° Supposons que AA' soit d'abord un tube de verre. Introduisons dans le grand tube un peu de poudre, répandons-la

---

appelée vulgairement *liqueur des cailloux*, on obtient un précipité gélatineux, qui, calciné au rouge, donne la silice amorphe SiO^2.

uniformément sur les parois préalablement desséchées, puis fermons l'instrument par l'obturateur *g*.

2° L'appareil ainsi monté est attaché sur une table par l'intermédiaire des pinces de la *fig.* 163. On soutient le grand tube par le point A, et la verge de verre AA′ par son milieu.

3° Passons le drap mouillé sur la verge et faisons-la vibrer: aussitôt la poudre se distribue sur un certain nombre de segments marqués par des tas, ou bien encore, quand la silice est bien préparée, par des membranes très minces s'élevant du fond du tube et le fermant presque entièrement. En déplaçant l'obturateur *g*, on trouve facilement une position pour laquelle les accumulations de poudre se font à des distances rigoureusement égales les unes des autres. Un amas se trouve alors auprès du piston mobile, un autre contre l'obturateur, ainsi que le montre la *fig.* 162. Les endroits où la poudre s'accumule sont les nœuds de la colonne d'air vibrante : le sable ne s'y meut pas. Le caractère des figures varie avec la poudre qu'on emploie, mais un observateur judicieux distinguera toujours sans peine un nœud d'un ventre. Les stratifications de sable sont plus nettes que les amas de lycopode.

4° Quelquefois, il y a lieu de déplacer légèrement le point fixe de la verge; car on peut faciliter de la sorte la production du son. Il est à remarquer que la manière de serrer la verge n'a aucune influence sur la hauteur du son produit ([1]). Il est essentiel que le piston ne frotte nullement dans le grand tube, si l'on veut que le son reste pur.

5° Déterminons la longueur l d'une demi-onde, puis mesurons la longueur totale l' de la verge vibrante. Leur rapport $\frac{l'}{l}$ donnera la vitesse du son dans le verre en fonction de celle dans l'air. Il est peut-être inutile de dire qu'on mesure la longueur d'un certain nombre de demi-ondes bien formées, une vingtaine par exemple, pour en déduire la valeur de l'une d'elles. De plus, pour rendre l'erreur de mesure aussi petite que possible, on répète les mesures un grand nombre de fois.

([1]) Des expériences spéciales ont même démontré que le point fixe peut être éloigné de deux ou trois centimètres du milieu, sans modifier la note donnée par la verge.

Si la verge était pincée en deux endroits, sa longueur ne représenterait plus une demi-onde, mais une onde entière.

6° Remplaçons le tube AA′ par une verge quelconque et recommençons la même expérience; nous déterminerons la vitesse du son dans les divers solides que nous emploierons.

7° Remettons en sa place le tube de verre AA′ et introduisons successivement des gaz de nature diverse dans le grand tube; la poudre y marquera des concamérations différentes des premières, que nous mesurerons avec soin comme précédemment. Le rapport des longueurs déterminées de la sorte sera égal au rapport des vitesses dans les gaz comparés.

Quand on dispose d'un appareil double, cette détermination devient très précise.

Résultats.

Les chiffres suivants sont empruntés à un Mémoire de M. Kundt.

1° *Vitesse du son dans le laiton.*

Longueur de la verge	$941^{mm},5$
Diamètre	$5^{mm},0$

Cette verge était pincée en deux points.

Nombre de demi-ondes mesurées dans l'air.	27
Longueur d'une demi-onde d'air	$43^{mm},30$
Vitesse du son en fonction de celle dans l'air...... $= \frac{941,5}{2.43,3}$....	10,87

2° *Vitesse du son dans l'acier.*

Longueur de la verge	$1002^{mm},7$
Diamètre	$10^{mm},0$

$$V = 15,345\ (^1).$$

3° *Vitesse du son dans le verre.*

Longueur du tube	$647^{mm},0$

$$V = 15,24.$$

---

(1) Wertheim avait trouvé 15,108.

4° *Vitesses dans les gaz.*

La disposition de l'instrument restant la même, on observa :

Dans l'acide carbonique............	40 demi-ondes.
» le gaz d'éclairage....	20 »
» l'hydrogène.................	9 »

alors que, dans l'air, on en compte 32. Il en résulte les vitesses suivantes dans ces gaz, en fonction de celle de l'air prise pour unité :

Acide carbonique.........................	0,8
Gaz d'éclairage...........................	1,6
Hydrogène................................	3,56 (¹)

5° *Influence de la température.*

Une baguette de verre vibrant dans un tube de verre a produit des concamérations de

A 14°..............................	35^{mm},743
20................................	36,570
30................................	37,357

d'où l'on conclut assez exactement que la vitesse du son est représentée correctement par la formule connue $V = V_0\sqrt{1 + \alpha t}$.

M. Kundt a démontré encore les deux lois suivantes, déjà formulées par Regnault :

1° La vitesse du son diminue avec le diamètre du tuyau, toutes les fois que ce diamètre est moindre que la moitié de la concamération.

2° La diminution est d'autant plus rapide que le son est plus grave ou que l'onde est plus longue.

Ces lois ressortent des Tableaux d'expériences suivants :

Diamètre du tube.	$\lambda = 90^{mm}$.	$\lambda = 45^{mm}$.
55^{mm}...................	V = 332^{mm},8	332^{mm},8
26...................	332,73	332,66
13...................	329,47	329,88
6,5.................	323,00	327,14
3,5.................	305,42	318,88

(¹) Dulong avait trouvé, pour le premier et le dernier gaz, 0,79 et 3,80.

XCVI^e MANIPULATION.

INSCRIPTION DES MOUVEMENTS VIBRATOIRES COMPOSÉS.

Théorie.

Supposons que deux corps vibrent à la fois et que leurs mouvements se superposent : le nombre des vibrations par seconde du premier corps sera, par exemple, bn, le nombre du second, an; après un temps $\frac{1}{n}$, le premier aura fait b, le second a vibrations, et ils se retrouveront dans la même situation respective qu'à l'origine. Pendant une seconde, cet accord se présentera n fois, et il produira autant de concordances et de discordances pendant lesquelles les déplacements s'additionneront ou se retrancheront. Cette combinaison des mouvements parallèles, qui donne naissance aux sons résultants et aux battements, peut être rendue visible et même inscrite : c'est l'objet de cette manipulation, dont nous empruntons l'idée à MM. Desains et Lissajous.

Description.

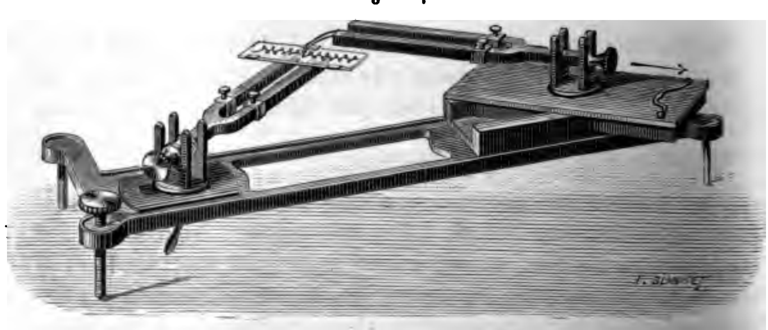
Un même appareil se prête à la combinaison parallèle et à la combinaison rectangulaire des mouvements vibratoires.

Deux diapasons de grandes dimensions (*fig.* 164) sont disposés l'un en face de l'autre, parallèlement ou rectangulairement, sur un banc de fonte; l'un est fixe et porte une petite lame de verre noirci; l'autre est mobile, et l'une de ses branches est armée d'une pointe fixe. Un chariot permet de faire glisser rapidement le second diapason au-dessus du premier; sa pointe effleure la glace et y trace le mouvement composé qu'on veut étudier.

Le diapason porte-lames donne généralement l'ut_1 : deux contrepoids à glissière remplacent la boule de cire par laquelle, autrefois, on déterminait le ton exact des diapasons; une petite masse de métal fait équilibre sur la seconde branche au poids de la lame de verre.

Le diapason inscrivant donnera ut_1, sol_1, ou ut_2, soit 128, 192 ou 256 vibrations simples par seconde, si l'on admet le premier nombre pour l'ut_1. Le chariot peut être tiré à la main ou bien on le mettra en mouvement par la chute d'un poids, mais le premier mode comporte une exactitude suffisante.

Fig. 164.



On ne doit employer pour ces expériences que des diapasons de grande longueur, dont les branches aient une forte épaisseur : de la sorte, l'amplitude pourra être assez considérable et le son restera simple, ainsi que l'a fait observer M. Kœnig.

Manuel opératoire.

Cette expérience ne présente aucune difficulté : MM. Lissajous et Desains ont fait de beaux tracés en tenant le diapason mobile à la main. L'instrument que nous avons décrit, d'après un modèle de M. Lancelot, facilite singulièrement l'opération, qui est dès lors mise à la portée de tous. Nous croyons toutefois devoir prévenir les élèves que, pour obtenir des courbes bien nettes, ils auront à appliquer tous leurs soins et toute leur vigilance; les pointes doivent être fines et moyennement élastiques; elles appuieront légèrement et normalement sur le verre; le dépôt de noir, obtenu par une lampe à alcool mêlé d'essence, sera fort mince et très régulier, etc..

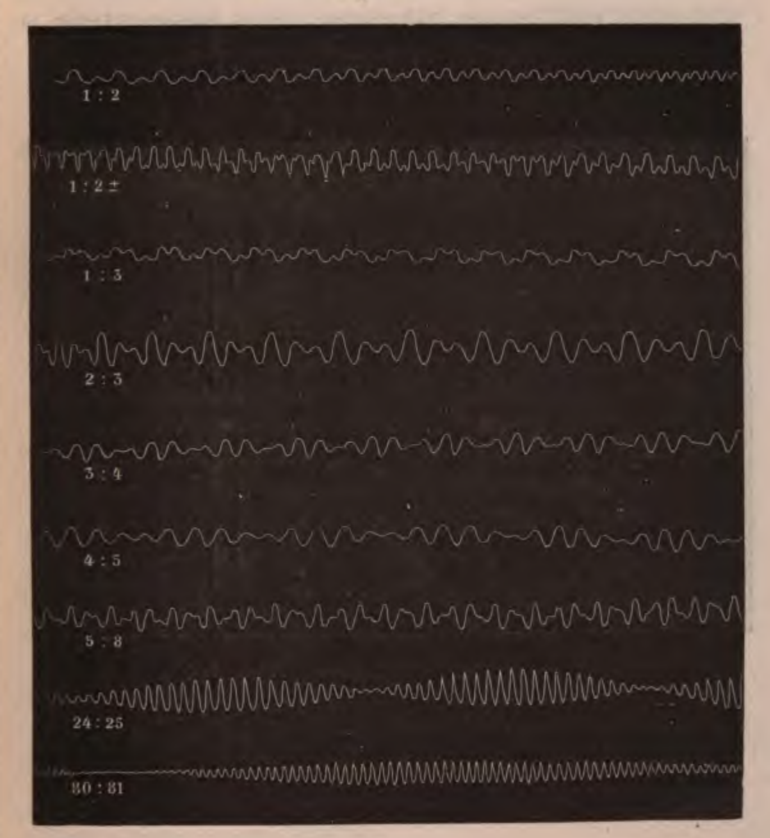
Voici la suite des opérations à effectuer :

1° Les diapasons étant parfaitement assujettis et bien horizontaux, on les attaque vigoureusement par un archet.

2° Le diapason mobile est déplacé d'un mouvement rapide, aussi uniforme que possible.

3° On fixe le tracé sur le verre par de l'essence de térébenthine dissolvant un peu de gomme laque.

Fig. 165.



Résultats.

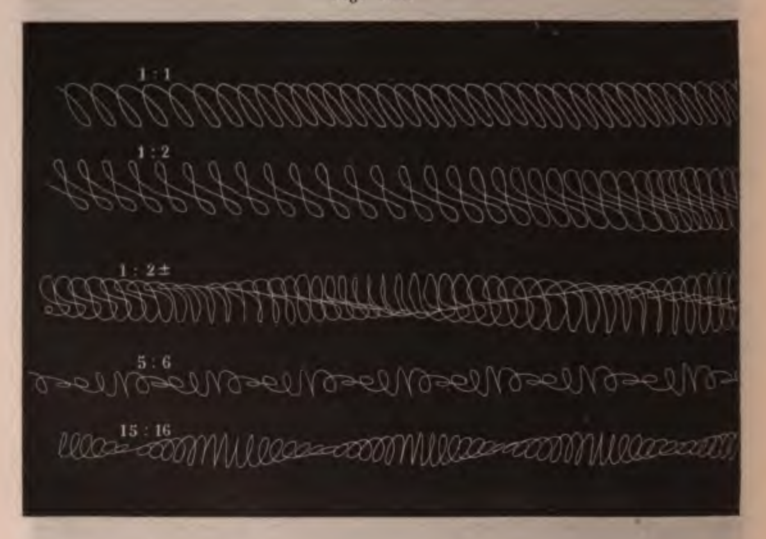
On voit sur la *fig.* 165 le résultat de la combinaison des vibrations parallèles.

La première ligne correspond à l'octave ut_1, ut_2; la qua-

trième à la quinte ut_1, sol_1; la huitième et la neuvième aux rapports $\frac{25}{24}$ et $\frac{81}{80}$. Ces derniers intervalles s'obtiennent sans peine par un déplacement des curseurs des diapasons à l'unisson.

Ces tracés, relatifs aux notes qui diffèrent d'un demi-ton ou d'un coma, sont les plus intéressants qu'on puisse obtenir, et ils peuvent servir à accorder les diapasons.

Fig. 166.



En combinant des mouvements rectangulaires, on obtient les courbes de la *fig.* 166, dont les formes enchevêtrées et singulières sont fort remarquables.

FIN.

TABLE

ALPHABÉTIQUE ET ANALYTIQUE.

A

B

C

D

F

G

H

I

L

M

O

P

S

T

U

V

Z

7938 Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, quai des Augustins, 55.





